



Pêches et Océans
Canada

Fisheries and Oceans
Canada

Sciences des écosystèmes
et des océans

Ecosystems and
Oceans Science

Secrétariat canadien des avis scientifiques (SCAS)

Document de recherche 2025/013

Région du Pacifique

Mesures et indicateurs géospatiaux des menaces pour l'habitat du poisson dans le bassin du fleuve Fraser, en prenant Thompson-Nicola comme étude de cas

Josephine C. Iacarella, Keegan Paterson, Anna Potapova, J. Daniel Weller

Pêches et Océans Canada
Laboratoire de Cultus Lake
4222, chemin Columbia Valley
Cultus Lake (Colombie-Britannique) V2R 5B6

Avant-propos

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

Publié par :

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

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



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

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

ISSN 2292-4272

ISBN 978-0-660-77030-7 N° cat. Fs70-5/2025-013F-PDF

La présente publication doit être citée comme suit :

Iacarella, J.C., Paterson, K., Potapova, A. et Weller, J.D. 2025. Mesures et indicateurs géospatiaux des menaces pour l'habitat du poisson dans le bassin du fleuve Fraser, en prenant Thompson-Nicola comme étude de cas. Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2025/013. xv + 145 p.

Also available in English :

Iacarella, J.C., Paterson, K., Potapova, A., and Weller, J.D. 2025. Geospatial Indicators and Metrics for Threats to Fish Habitat in the Fraser River Basin with Thompson-Nicola as a Case Study. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2025/013. xiii + 126 p.

TABLE DES MATIÈRES

ACRONYMES.....	xiv
RÉSUMÉ.....	xv
1. INTRODUCTION	1
1.1. CONTEXTE.....	1
1.2. RENSEIGNEMENTS DE BASE	2
1.3. OBJECTIFS.....	5
2. MÉTHODES.....	7
2.1. ZONE D'ÉTUDE.....	7
2.2. COMPOSANTES ÉCOSYSTÉMIQUES FOCALES.....	9
2.3. ESTIMATION DES MENACES	10
2.3.1. Menaces liées aux activités humaines et aux perturbations du paysage	12
2.3.2. Menaces liées aux changements climatiques.....	33
2.4. COTE DE MENACE CUMULATIVE.....	40
2.5. ÉVALUATION TEMPORELLE	42
2.6. UHE DE THOMPSON-NICOLA	42
3. RÉSULTATS.....	46
3.1. MENACES DE L'ACTIVITÉ HUMAINE ET DE LA PERTURBATION DU PAYSAGE	46
3.2. MENACES LIÉES AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES.....	58
3.3. SOMMAIRES	65
3.4. ÉVALUATION TEMPORELLE	76
3.5. UHE DE THOMPSON-NICOLA	79
4. DISCUSSION.....	91
4.1. APERÇU	91
4.2. COMPARAISON AVEC D'AUTRES ÉVALUATIONS PERTINENTES	93
4.3. APPLICATION À L'UHE DE THOMPSON-NICOLA	94
4.4. INCERTITUDES ET LIMITES	96
4.5. ÉVALUATION FUTURE	111
5. REMERCIEMENTS	113
6. RÉFÉRENCES CITÉES	114
ANNEXE A. UNITÉS D'ÉVALUATION	121
ANNEXE B. UNITÉS DÉSIGNABLES DES ESPÈCES EN PÉRIL ET DU SAUMON.....	123
ANNEXE C. INFORMATION SUR LES DONNÉES	130
ANNEXE D. COTES DE LA MODIFICATION DU DÉBIT.....	135
ANNEXE E. MODÈLES CLIMATIQUES MONDIAUX	136
ANNEXE F. PARAMÈTRES DE RENDEMENT DU DÉBIT DES COURS D'EAU.....	137
ANNEXE G. COTES DES MENACES CUMULATIVES PAR UNITÉ DE CONSERVATION DU SAUMON	140

ANNEXE H. RÉSULTATS PROJETÉS POUR L'UHE DE THOMPSON-NICOLA	142
--	-----

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Coefficients de concentration utilisés pour calculer les contributions des sources diffuses d'éléments nutritifs, de pollution et de sédimentation dans les cours d'eau en Colombie-Britannique.....31

Tableau 2. Incertitudes, limites, capacité d'étendre la méthodologie au reste de la région du Pacifique et taux de confiance pour chaque menace estimée. Les taux de confiance sont « faible » (les données existent, mais sont considérées comme faibles ou contradictoires), « moyen » (les données existent, mais il existe d'importantes lacunes) et « élevé » (les données existent et sont considérées comme solides); les principaux facteurs décisifs pour les cotes sont entre parenthèses.99

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Étendue du bassin du fleuve Fraser (a; contour noir) et de l'unité hydrographique écologique de Thompson-Nicola (a; contour orange) en Colombie-Britannique, au Canada (polygone bleu clair sur la carte de l'Amérique du Nord). Les principaux cours d'eau et principales caractéristiques topographiques sont décrits sur le graphique a), les principaux bassins hydrographiques sur le graphique b) et les groupes de bassins hydrographiques sur le graphique c). Les abréviations des groupes de bassins hydrographiques (« codes ») sont indiquées dans le tableau A1 de l'annexe A.	8
Figure 2. Composantes écosystémiques focales de l'analyse des menaces cumulatives. Comprend (a) le réseau de cours d'eau complet pour le bassin du fleuve Fraser (panneau de gauche, lignes grises), l'habitat de cours d'eau délimité pour les espèces de poisson en péril et (b) les unités de conservation du saumon du Pacifique et celles désignées comme préoccupantes, menacées ou en voie de disparition (« en péril ») par le COSEPAC (contours codés par couleur; à noter que les UC du saumon coho couvrent l'ensemble du BFF).	10
Figure 3. Cadre d'évaluation des menaces cumulatives pour le poisson et son habitat dans le bassin du fleuve Fraser, en Colombie-Britannique. Les parenthèses pour les espèces focales indiquent le nombre d'unités désignables (UD) définies pour les espèces en péril ou les unités de conservation (UC) du saumon qui sont préoccupantes, menacées ou en voie de disparition sur le nombre total dans le bassin.	11
Figure 4. Diagramme des séquences des effets de la menace des espèces aquatiques envahissantes.	14
Figure 5. Méthode de calcul de la cote de la menace des espèces aquatiques envahissantes à partir de la richesse en espèces aquatiques non indigènes.	14
Figure 6. Diagramme des séquences des effets de la menace de la modification du débit.	16
Figure 7. Diagramme des séquences des effets de la menace de la destruction de l'habitat dans les cours d'eau.	17
Figure 8. Calcul de la menace de la destruction de l'habitat dans les cours d'eau.	18
Figure 9. Diagramme des séquences des effets de la menace de la fragmentation latitudinale. L'étendue de la plaine inondable n'a pas été incluse dans la cote, mais elle est indiquée comme contexte important pour la cote.	19
Figure 10. Méthode utilisée pour déterminer l'association des obstacles à l'habitat de plaine inondable.	19
Figure 11. Diagramme des séquences des effets de la menace de la fragmentation longitudinale. Seuls les barrages considérés comme des obstacles complets ont été inclus dans cette évaluation, bien que des obstacles partiels puissent également bloquer complètement le passage. Les ponceaux n'ont pas encore été inclus pour le BFF, car ils n'ont pas été entièrement évalués comme blocages, mais on sait qu'ils créent des milliers d'obstacles en C.-B. et qu'ils constituent un facteur important pour l'estimation future de la menace.	21
Figure 12. Fragmentation longitudinale pour les espèces résidentes en fonction de la longueur du cours d'eau accessible entre les barrages et les obstacles naturels.	22
Figure 13. Fragmentation longitudinale pour les espèces anadromes fondée sur la longueur du cours d'eau bloquée en amont des barrages initiaux.	23
Figure 14. Diagramme des séquences des effets de la menace de la perturbation du milieu riverain. EMP = Emprise.	25

Figure 15. Calcul de la menace de la perturbation du milieu riverain.	25
Figure 16a. Diagramme des séquences des effets pour la charge en éléments nutritifs. Les intrants de sources ponctuelles pour les éléments nutritifs contenaient des valeurs sur les activités humaines, y compris les mines, les usines de pâtes et papiers, les propriétaires de BPC, les installations de transformation des fruits de mer, les déchets solides, les déversements, les usines de traitement des eaux usées, les déchets de bois et autres installations commerciales, indiquées dans une base de données compilée (ECCC 2022).	27
Figure 16b. Diagramme des séquences des effets pour la charge en pollution. Les intrants de sources ponctuelles pour la pollution contenaient des valeurs sur les activités humaines, y compris les mines, les usines de pâtes et papiers, les propriétaires de BPC, les installations de transformation des fruits de mer, les déchets solides, les déversements, les usines de traitement des eaux usées, les déchets de bois et autres installations commerciales, indiquées dans une base de données compilée (ECCC 2022).	28
Figure 16c. Diagramme des séquences des effets pour la charge en sédiments.	29
Figure 17. Étapes de l'accumulation du débit utilisées pour estimer les intrants d'éléments nutritifs, de pollution et de sédiments dans les cours d'eau résultant des activités humaines et des perturbations du paysage.	31
Figure 18. Méthode pour réduire l'échelle du ruissellement des cours d'eau et attribuer les valeurs du débit aux bassins hydrographiques fondamentaux (Foundry Spatial). Les valeurs matricielles à échelle réduite (Y_i) sont calculées à partir de la valeur du ruissellement (en mm) de la cellule de grille du modèle CIV-GL (r), de la précipitation moyenne (en mm) dans une cellule de grille du modèle CIV-GL (m_1) et de la précipitation moyenne (en mm) de l'unité du bassin hydrographique (X_i).	37
Figure 19. Calcul des contributions proportionnelles des intrants en fonction des estimations de la menace pour la destruction de l'habitat dans les cours d'eau et la perturbation du milieu riverain.	42
Figure 20. Rubrique des conséquences potentielles pour la gestion, indiquées par la combinaison multiplicative des cotes de menace avec les valeurs de l'habitat du saumon, comme l'habitat favorable modélisé. Les symboles d'étoiles le long du gradient de la cote composite multiplicative représentent une approximation de leur distribution relative de 0 à 1, en fonction de la rubrique codée par couleur, avec des exemples d'emplacements.	44
Figure 21. Cote de l'exposition à la menace des espèces aquatiques envahissantes. Les cotes transformées et mises à l'échelle de 0 à 1 indiquent une augmentation de la richesse en espèces non indigènes d'après les répartitions estimées.	47
Figure 22. Cote de l'exposition à la menace de la modification du débit. Les cotes transformées et mises à l'échelle de 0 à 1 indiquent une augmentation de la modification du débit par les ponceaux (variation de la vitesse de l'eau), les barrages (variation de la quantité d'eau) et l'extraction d'eau (variation de la quantité d'eau).	48
Figure 23. Cote de l'exposition à la menace de la destruction de l'habitat dans les cours d'eau. Les cotes transformées et mises à l'échelle de 0 à 1 indiquent une augmentation de la destruction de l'habitat dans les cours d'eau estimée en fonction des empreintes de l'activité humaine et de la perturbation du paysage qui chevauchent les étendues des cours d'eau.	49
Figure 24. Cote de l'exposition à la menace de la fragmentation latitudinale. Les cotes transformées et mises à l'échelle de 0 à 1 indiquent une plus grande déconnexion possible de l'habitat de plaine inondable causée par les barrières de protection contre les inondations et l'utilisation des terres urbaines.	50

Figure 25. Cote de l'exposition à la menace de la fragmentation longitudinale pour les espèces anadromes. Les cotes transformées et mises à l'échelle de 0 à 1 indiquent que le réseau de cours d'eau bloqué est plus long d'après l'étendue entre le premier obstacle complet créé par un barrage en amont de l'entrée dans l'océan et l'obstacle suivant (barrage ou obstacle naturel). Les cotes ont été appliquées aux cours d'eau en amont des barrages subséquents, mais en aval des obstacles naturels.....	51
Figure 26. Cote de l'exposition à la menace de la fragmentation longitudinale pour les espèces résidentes. Les cotes transformées et mises à l'échelle de 0 à 1 indiquent des longueurs de cours d'eau connectées plus courtes entre les barrages créant un obstacle complet et des obstacles naturels.	52
Figure 27. Cote de l'exposition à la menace de la perturbation du milieu riverain. Les cotes transformées et mises à l'échelle de 0 à 1 indiquent une augmentation de la perturbation du milieu riverain estimée d'après les empreintes de l'activité humaine et de la perturbation du paysage qui chevauchent les zones tampons riveraines (dans un rayon de 30 m des tronçons de cours d'eau).	53
Figure 28. Cote de la charge en éléments nutritifs d'origine humaine. Les cotes transformées et mises à l'échelle de 0 à 1 indiquent une augmentation estimée de la charge en éléments nutritifs provenant de sources ponctuelles et diffuses.	54
Figure 29. Cote de la charge en pollution. Les cotes transformées et mises à l'échelle de 0 à 1 indiquent une augmentation estimée de la charge en pollution provenant de sources ponctuelles et diffuses.....	55
Figure 30. Cote de la charge en sédiments d'origine humaine. Les cotes transformées et mises à l'échelle de 0 à 1 indiquent une augmentation estimée de la charge en sédiments provenant de sources ponctuelles et diffuses.	56
Figure 31. Cote des menaces cumulatives additives fondée sur l'activité humaine et la perturbation du paysage.	57
Figure 32. Cotes des menaces cumulatives de l'activité humaine et de la perturbation du paysage mises à l'échelle, fondées sur le cumul (a) des cotes continues et des cotes transformées et (b) des cotes classées. Les symboles de la légende s'appliquent aux deux cartes.	58
Figure 33. Menace de risque d'inondation fondée sur la modélisation (a) du niveau d'eau en surface historique (de 1980 à 2019) et de la variation prévue de ce niveau (entre les périodes de 1980 à 2019 et de 2022 à 2060) pour une période de retour de 100 ans selon (b) le profil RCP 4.5 et (c) le profil RCP 8.5. Le changement absolu du niveau d'eau en surface a été transformé et mis à l'échelle de sorte qu'une cote plus élevée indiquait une variation plus importante (positive ou négative).	59
Figure 34. %DAM mensuel minimum modélisé (calculé comme le débit mensuel moyen sur l'année) pour les conditions climatiques moyennes de 1981 à 2010 pendant les mois d'été à faible débit : (a) juillet, (b) août et (c) septembre.	60
Figure 35. Menace du débit faible d'après le %DAM mensuel minimal d'août modélisé (calculé comme le débit mensuel moyen sur l'année) pour les conditions climatiques moyennes (a) de 1981 à 2010 et de 2040 à 2060 selon (b) le profil RCP 4.5 et (c) le profil RCP 8.5. Nous avons calculé le %DAM mensuel projeté futur par rapport à la période historique (de 1981 à 2010). Les cotes de la menace du débit faible (fondées sur les valeurs cartographiées présentées ici) ont été transformées et mises à l'échelle inversée de 0 à 1, de sorte qu'une cote plus élevée indiquait des débits minimaux plus faibles.	61

Figure 36. %DAM mensuel maximum modélisé (calculé comme le débit mensuel moyen sur l'année) pour les conditions climatiques moyennes de 1981 à 2010 pendant les mois à débit élevé : (a) avril, (b) mai et (c) juin.	62
Figure 37. Menace du débit élevé d'après le %DAM mensuel maximal de mai modélisé (calculé comme le débit mensuel moyen sur l'année) pour les conditions climatiques moyennes (a) de 1981 à 2010 et de 2040 à 2060 selon (b) le profil RCP 4.5 et (c) le profil RCP 8.5. Nous avons calculé le %DAM mensuel projeté futur par rapport à la période historique (de 1981 à 2010). Les cotes de la menace du débit élevé (fondées sur les valeurs cartographiées présentées ici) ont été transformées et mises à l'échelle de 0 à 1, de sorte qu'une cote plus élevée indiquait des débits maximaux plus élevés.	63
Figure 38. Menace de la température chaude des cours d'eau fondée sur la moyenne modélisée des températures des cours d'eau en août pour (a) les conditions actuelles (de 2001 à 2020) et futures (de 2041 à 2060) selon (b) le profil RCP 4.5 et (c) le profil RCP 8.5. Les cotes de la menace de la température chaude mises à l'échelle de 0 à 1 indiquent une hausse des températures.	64
Figure 39. Cote de menace additive cumulative liée aux changements climatiques de 2040 à 2060 selon (a) le profil RCP 4.5 et (b) le profil RCP 8.5.	65
Figure 40. Diagrammes de quartiles de Tukey des menaces de l'activité humaine et de la perturbation du paysage : espèces aquatiques envahissantes (EAE), modification du débit (Mod. débit), destruction de l'habitat dans les cours d'eau (Destr. hab.), fragmentation latitudinale (Frag. lat.), fragmentation longitudinale pour les espèces anadromes (Frag. long. – anad.), fragmentation longitudinale pour les espèces résidentes (Frag. long. – rés.), perturbation du milieu riverain (Pert. riv.), éléments nutritifs (Nut.), pollution (Poll.) et sédimentation (Séd.). La ligne du diagramme représente la médiane des tronçons de cours d'eau, les charnières inférieure et supérieure représentent respectivement les 25 ^e et 75 ^e centiles, et les valeurs aberrantes sont les points au-dessus ou en dessous de 1,5 * la plage interquartile.	66
Figure 41. Diagrammes de quartiles de Tukey des cotes des menaces liées aux changements climatiques de 2040 à 2060 selon les profils RCP 4.5 et 8.5. Les cotes plus élevées indiquent une variation plus importante du niveau d'inondation absolu (« risque d'inondation »), des débits mensuels (%DAM) minimaux d'août plus faibles (« débit faible »), des débits mensuels (%DAM) maximaux de mai plus élevés (« débit élevé ») et des températures des cours d'eau plus chaudes en août (« température chaude »).	66
Figure 42. Diagrammes de quartiles de Tukey des cotes des menaces cumulatives pour les menaces de l'activité humaine et de la perturbation du paysage (panneau de gauche) et les menaces liées aux changements climatiques (panneau de droite) pour tous les cours d'eau du BFF et les cours d'eau situés dans les UC de saumon (en incluant uniquement les cours d'eau en aval des obstacles naturels pour le saumon). Les UC désignées comme préoccupantes, menacées ou en voie de disparition par le COSEPAC ont été différenciées des UC non en péril.	67
Figure 43. Diagrammes de quartiles de Tukey des cotes des menaces cumulatives pour les menaces de l'activité humaine et de la perturbation du paysage (panneau de gauche) et les menaces liées aux changements climatiques (panneau de droite) pour tous les cours d'eau du BFF et les habitats de cours d'eau délimités des espèces de poissons en péril.	68
Figure 44. Diagrammes de quartiles de Tukey des menaces de l'activité humaine et de la perturbation du paysage pour tous les cours d'eau du BFF et les cours d'eau situés dans les UC de saumon (en incluant uniquement les cours d'eau en aval des obstacles naturels pour le saumon). Les UC désignées comme préoccupantes, menacées ou en voie de disparition par le	

COSEPAC ont été différenciées des UC non en péril (voir les résultats de chaque UC à la figure G1 de l'annexe G).....	69
Figure 45. Diagrammes de quartiles de Tukey des menaces de l'activité humaine et de la perturbation du paysage pour tous les cours d'eau du BFF et les habitats de cours d'eau délimités des espèces de poissons en péril.....	70
Figure 46. Diagrammes de quartiles de Tukey des menaces liées aux changements climatiques de 2040 à 2060 selon le profil RCP 4.5 pour tous les cours d'eau du bassin du fleuve Fraser et pour les cours d'eau qui se trouvent dans les UC de saumon (en incluant uniquement les cours d'eau en aval des obstacles naturels pour le saumon). Les UC désignées comme préoccupantes, menacées ou en voie de disparition par le COSEPAC ont été différenciées des UC non en péril (voir les résultats de chaque UC à la figure G2 de l'annexe G). Les cotes plus élevées indiquent une variation plus importante du niveau d'inondation absolu (« risque d'inondation »), des débits mensuels (%DAM) minimaux d'août plus faibles (« débit faible »), des débits mensuels (%DAM) maximaux de mai plus élevés (« débit élevé ») et des températures des cours d'eau plus chaudes en août (« température chaude »).....	71
Figure 47. Diagrammes de quartiles de Tukey des menaces liées aux changements climatiques de 2040 à 2060 selon le profil RPC 4.5 pour tous les cours d'eau du bassin du fleuve Fraser et les habitats de cours d'eau délimités des espèces de poissons en péril. Les cotes plus élevées indiquent une variation plus importante du niveau d'inondation absolu (« risque d'inondation »), des débits mensuels (%DAM) minimaux d'août plus faibles (« débit faible »), des débits mensuels (%DAM) maximaux de mai plus élevés (« débit élevé ») et des températures des cours d'eau plus chaudes en août (« température chaude »).....	72
Figure 48. Résumé des résultats pour les groupes de bassins hydrographiques, indiquant (a) la médiane de la cote des menaces cumulatives pour les menaces de l'activité humaine et de la perturbation du paysage et (b) l'activité ou la perturbation la plus répandue contribuant aux menaces dans l'ensemble des cours d'eau, en fonction de leur occurrence en amont, en aval ou dans une zone d'intérêt d'un cours d'eau, selon leur pertinence pour chaque cote de menace.	73
Figure 49a. Proportions moyennes des intrants de l'activité humaine et de la perturbation du paysage entre les cours d'eau des groupes de bassins hydrographiques pour la destruction de l'habitat dans les cours d'eau. Les groupes de bassins hydrographiques sont classés selon la valeur médiane de la menace, de la plus élevée à la plus faible, puis par ordre alphabétique au besoin. Voir les abréviations des groupes de bassins hydrographiques (« codes ») dans le tableau A1 à l'annexe A.	74
Figure 49b. Proportions moyennes des intrants de l'activité humaine et de la perturbation du paysage entre les cours d'eau des groupes de bassins hydrographiques pour la perturbation du milieu riverain. Les groupes de bassins hydrographiques sont classés selon la valeur médiane de la menace, de la plus élevée à la plus faible, puis par ordre alphabétique au besoin. Voir les abréviations des groupes de bassins hydrographiques (« codes ») dans le tableau A1 à l'annexe A.	74
Figure 49c. Proportions moyennes des intrants de l'activité humaine et de la perturbation du paysage entre les cours d'eau des groupes de bassins hydrographiques pour la charge en éléments nutritifs. Les groupes de bassins hydrographiques sont classés selon la valeur médiane de la menace, de la plus élevée à la plus faible, puis par ordre alphabétique au besoin. La classe d'utilisation des terres « autres non urbaines » a été exclue pour visualiser d'autres intrants, mais représente le reste des contributions. Voir les abréviations des groupes de bassins hydrographiques (« codes ») dans le tableau A1 à l'annexe A.	75

Figure 49d. Proportions moyennes des intrants de l'activité humaine et de la perturbation du paysage entre les cours d'eau des groupes de bassins hydrographiques pour la charge en pollution. Les groupes de bassins hydrographiques sont classés selon la valeur médiane de la menace, de la plus élevée à la plus faible, puis par ordre alphabétique au besoin. La classe d'utilisation des terres « autres non urbaines » a été exclue pour visualiser d'autres intrants, mais représente le reste des contributions. Voir les abréviations des groupes de bassins hydrographiques (« codes ») dans le tableau A1 à l'annexe A.....	75
Figure 49e. Proportions moyennes des intrants de l'activité humaine et de la perturbation du paysage entre les cours d'eau des groupes de bassins hydrographiques pour la charge en sédimentation. Les groupes de bassins hydrographiques sont classés selon la valeur médiane de la menace, de la plus élevée à la plus faible, puis par ordre alphabétique au besoin. La classe d'utilisation des terres « autres non urbaines » a été exclue pour visualiser d'autres intrants, mais représente le reste des contributions. Voir les abréviations des groupes de bassins hydrographiques (« codes ») dans le tableau A1 à l'annexe A.	76
Figure 50. Changements temporels de la couverture terrestre et de l'utilisation des terres (a) de 2018 à (b) 2022, montrant les cellules de grille dont le type de couverture terrestre a changé entre les années et une vue agrandie de l'étendue mettant en évidence les changements (c) de 2018 à (d) 2022.....	77
Figure 51. Changements temporels dans les périmètres des feux de forêt par périodes de 10 ans. Les périmètres de feux de forêt sont représentés pour (a) le BFF de 2008 à 2018 et de 2012 à 2022 avec les zones de chevauchement indiquées et (b-c) deux vues agrandies mettant en évidence le changement.	78
Figure 52. Changements temporels dans les blocs de coupe forestière par périodes de 10 ans. Les zones des blocs de coupe forestière sont représentées pour (a) le BFF de 2008 à 2018 et de 2012 à 2022 avec les zones de chevauchement indiquées et (b-c) deux vues agrandies mettant en évidence le changement.	78
Figure 53. Changements temporels dans la défoliation grave par les ravageurs forestiers par périodes de 10 ans. Les zones où la défoliation par les ravageurs forestiers est grave sont indiquées pour (a) le BFF de 2008 à 2018 et de 2012 à 2022 avec les zones de chevauchement indiquées et (b-c) deux vues agrandies mettant en évidence le changement.	79
Figure 54. UC de saumon du Pacifique dans l'UHE de Thompson-Nicola et celles qui sont désignées comme préoccupantes, menacées ou en voie de disparition par le COSEPAC (à noter que l'UC du saumon rose couvre l'étendue de l'UHE).	80
Figure 55. Diagrammes de quartiles de Tukey des cotes des menaces cumulatives pour les menaces de l'activité humaine et de la perturbation du paysage (panneau de gauche) et les menaces liées aux changements climatiques (panneau de droite) pour tous les cours d'eau de l'UHE de Thompson-Nicola et les cours d'eau situés dans les UC de saumon de l'UHE (en incluant uniquement les cours d'eau en aval des obstacles naturels pour le saumon). Les UC désignées comme préoccupantes, menacées ou en voie de disparition par le COSEPAC ont été différenciées des UC non en péril.	81
Figure 56. Diagrammes de quartiles de Tukey des menaces de l'activité humaine et de la perturbation du paysage pour tous les cours d'eau de l'UHE de Thompson-Nicola et les cours d'eau situés dans les UC de saumon (en incluant uniquement les cours d'eau en aval des obstacles naturels pour le saumon), notamment : espèces aquatiques envahissantes (EAE), modification du débit (Mod. débit), destruction de l'habitat dans les cours d'eau (Destr. hab.), fragmentation latitudinale (Frag. lat.), fragmentation longitudinale pour les espèces anadromes (Frag. long. – anad.), perturbation du milieu riverain (Pert. riv.), éléments nutritifs (Nut.),	

pollution (Poll.) et sédimentation (Séd.). Les UC désignées comme préoccupantes, menacées ou en voie de disparition par le COSEPAC ont été différenciées des UC non en péril. Les UC étaient des UC de saumon chinook (CK), de saumon coho (CO), de saumon rose – années impaires (ROI) et de saumon rouge – lacustre (SEL).....82

Figure 57. Diagrammes de quartiles de Tukey des cotes des menaces cumulatives et des paramètres des composantes pour les menaces liées aux changements climatiques de 2040 à 2060 selon le profil RCP 4.5 pour tous les cours d'eau de l'UHE de Thompson-Nicola et pour les cours d'eau qui se trouvent dans les UC de saumon (en incluant uniquement les cours d'eau en aval des obstacles naturels pour le saumon). Les cotes plus élevées indiquent une variation prévue plus importante du niveau d'inondation absolu (« risque d'inondation »), des débits mensuels (%DAM) minimaux d'août plus faibles (« débit faible »), des débits mensuels (%DAM) maximaux de mai plus élevés (« débit élevé ») et des températures des cours d'eau plus chaudes en août (« température chaude »). Les UC désignées comme préoccupantes, menacées ou en voie de disparition par le COSEPAC ont été différenciées des UC non en péril. Les UC étaient des UC de saumon chinook (CK), de saumon coho (CO), de saumon rose – années impaires (ROI) et de saumon rouge – lacustre (SEL).83

Figure 58. Médianes des cotes composites des menaces cumulatives pour les groupes de bassins hydrographiques dans l'UHE de Thompson-Nicola d'après la valeur multiplicative des menaces cumulatives de l'activité humaine et de la perturbation du paysage et la favorabilité environnementale modélisée pour la fraie : (rangée a) saumon chinook, (b) saumon coho, (c) saumon rose et (d) saumon rouge. Les probabilités de favorabilité environnementale modélisée utilisées dans la cote composite reposaient sur les conditions projetées (colonne a) actuelles et (b) futures pour tous les tronçons de cours d'eau (de 4e ordre ou plus), y compris les cours d'eau inaccessibles en raison de barrages et d'obstacles naturels. Les groupes de bassins hydrographiques qui sont en grande partie inaccessibles sont marqués par des lignes hachurées et les limites des UC de saumon sont tracées en noir.85

Figure 59. Cote composite des intrants riverains (a) fondée sur les cotes des intrants de sources diffuses et de la perturbation du milieu riverain. La cote des intrants riverains multipliée par la favorabilité environnementale modélisée pour la fraie du saumon (conditions de référence de 1981 à 2020) indiquait des tronçons de cours d'eau accessibles où les valeurs élevées des intrants riverains coïncidaient avec une grande favorabilité environnementale pour (b) le saumon chinook, (c) le saumon coho, (d) le saumon rose et (e) le saumon rouge. Les lignes de cours d'eau sont mises à l'échelle pour mettre en évidence celles qui ont des cotes plus élevées.....86

Figure 60. Carte (a) du débit mensuel minimal (%DAM) le plus bas pour chaque tronçon de cours d'eau dans des conditions historiques (de 1981 à 2010) et des quantités autorisées d'extraction d'eau (symboles proportionnels à la quantité autorisée, en m³/an). La cote composite des ressources en eau (b) était fondée sur une cote multiplicative de l'inverse du débit mensuel minimal (%DAM) le plus faible et de l'extraction d'eau autorisée. Vue agrandie des résultats pour les conditions climatiques (c), historiques et (d) futures (de 2040 à 2060). Les lignes de cours d'eau sur les graphiques b à d sont mises à l'échelle pour mettre en évidence celles qui ont des cotes plus élevées.....88

Figure 61. Cote composite des ressources en eau fondée sur l'inverse du débit mensuel minimal (%DAM) le plus faible (c.-à-d. qu'une valeur plus élevée équivaut à un débit plus faible) dans les conditions historiques (de 1981 à 2010) et les quantités d'extraction d'eau autorisées dans l'UHE de Thompson-Nicola. La moyenne des cotes des cours d'eau a été établie par groupe de bassins hydrographiques et les UC de saumon connexes, différenciées par leur statut de risque. Les groupes de bassins hydrographiques ayant une cote composite moyenne

supérieure à 0,05 sont étiquetés : ruisseau Bridge (BRID), cours inférieur de la rivière North Thompson (LNTH), rivière Nicola (NICL), lac Shuswap (SHUL), rivière South Thompson (STHM), rivière Thompson (THOM) et cours supérieur de la rivière North Thompson (UNTH). Les points pour les deux axes correspondent à la moyenne ± 1 ET.89

Figure 62. Cote composite de la fragmentation pour les espèces anadromes d'après la quantité bloquée du réseau de cours d'eau en amont d'un barrage initial jusqu'aux obstacles subséquents (naturels ou créés par des barrages) et la moyenne correspondante de l'habitat de fraie favorable modélisé en amont dans l'UHE de Thompson-Nicola. L'habitat de fraie favorable concerne les conditions climatiques actuelles (de 2001 à 2020); les projections futures sont présentées à l'annexe H (figures H3, H4). Les groupes de bassins hydrographiques sont étiquetés pour les cours d'eau bloqués dont les cotes composites sont supérieures à 0,85 et comprennent la rivière Adams (ADMS), le cours inférieur de la rivière North Thompson (LNTH) et la haute Shuswap (USHU). Les points sont la moyenne ± 1 ET.....90

Figure 63. Cote composite de la fragmentation pour les espèces anadromes pour les barrages qui sont le premier blocage du passage en amont dans l'UHE de Thompson-Nicola. Les cotes composites changent avec les scénarios climatiques pour les périodes actuelle (de 2001 à 2020) et future (de 2041 à 2060), car on prévoit des changements dans l'habitat favorable pour la fraie du saumon en fonction des projections de la température de l'eau et des précipitations. Les zones grises mettent en évidence les barrages dont les cotes sont les plus élevées.91

ACRONYMES

BFF	Bassin du fleuve Fraser
BPC	Biphényles polychlorés
C.-B.	Colombie-Britannique
CIV-GL	Capacité d'infiltration variable – Glacier
COSEPAC	Comité sur la situation des espèces en péril au Canada
DAM	Débit annuel moyen
DEL	Diode électroluminescente
É.-U.	États-Unis
EAE	Espèces aquatiques envahissantes
FIDQ	Fisheries Inventory Data Queries
FWA	Freshwater Atlas
HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
KCO	Coefficient de partage du carbone organique
LiDAR	Détection et télémétrie par ondes lumineuses
Log KOE	Coefficient de partage octanol-eau
MCG	Modèle de circulation générale
NT	Azote total
OD	Oxygène dissous
OIPABP	Outil d'inventaire des polluants affectant les baleines et leurs proies
PCIC	Pacific Climate Impacts Consortium
pH	Potentiel hydrogène
PIES	Planification intégrée des écosystèmes du saumon
PPPH	Programme de protection du poisson et de son habitat
PSE	Pacific Salmon Explorer
PT	Phosphore total
RCP	Profil représentatif d'évolution de concentration
SBOT	Stewardship Baseline Objectives Tool
SCAS	Secrétariat canadien des avis scientifiques
UC	Unité de conservation
UD	Unité désignable
UHE	Unité hydrographique écologique
WWF	Fonds mondial pour la nature

RÉSUMÉ

La gestion du poisson et de son habitat et la production de rapports à ce sujet exigent des renseignements spatialement complets sur les variations des menaces qui pèsent sur le poisson et son habitat dans l'ensemble du paysage et sur celles qui peuvent représenter le plus grand risque pour les écosystèmes et les espèces préoccupantes. Les méthodes géospatiales sont les mieux adaptées pour fournir de tels renseignements à grande échelle grâce à la modélisation et à la cartographie des menaces continues découlant des activités humaines et des perturbations du paysage, ainsi qu'à la projection des menaces liées aux changements climatiques dans une région. Nous avons effectué une évaluation des menaces cumulatives pour le réseau du bassin du fleuve Fraser afin d'estimer les menaces (appliquées ici en tant qu'exposition) importantes pour la gestion du saumon du Pacifique et des espèces en péril en eau douce et de caractériser les profils spatiaux des niveaux des menaces dans les cours d'eau et les étendues d'habitat des espèces focales. Nous avons présenté une méthodologie qui s'appuie sur les évaluations géospatiales existantes en Colombie-Britannique pour estimer les menaces d'origine anthropique que sont les espèces aquatiques envahissantes, la modification du débit, la destruction de l'habitat dans les cours d'eau, la fragmentation latitudinale, la fragmentation longitudinale, la perturbation du milieu riverain, les éléments nutritifs, la pollution et la sédimentation, ainsi que les menaces de risque d'inondation, de débit faible des cours d'eau, de débit élevé des cours d'eau et de températures chaudes des cours d'eau liées aux changements climatiques. Nous avons fourni des estimations et des résumés des menaces dans les cours d'eau, les bassins hydrographiques et l'étendue de l'habitat du saumon du Pacifique et des espèces en péril. Nous avons également évalué la capacité de réévaluer les menaces au fil du temps pour la production de rapports sur l'état des menaces pesant sur l'état du poisson et de son habitat en fonction des données d'entrée. Nous avons ensuite donné des exemples montrant la manière dont l'information provenant des cotes des menaces, des intrants connexes et des valeurs du saumon (unités de conservation, habitat de fraie favorable modélisé) peut être utilisée collectivement pour guider la planification des priorités pour la gestion et la restauration et leur classement par ordre de priorité. Nous l'avons fait pour l'unité hydrographique écologique de Thompson-Nicola et fourni des renseignements spatiaux liés à la restauration des zones riveraines, à l'allocation de prélèvement d'eau et à l'atténuation des obstacles. Les incertitudes et les limites, ainsi que les étapes de la future évaluation des menaces cumulatives, ont été détaillées.

1. INTRODUCTION

1.1. CONTEXTE

Le 28 août 2019, la *Loi sur les pêches* modernisée est entrée en vigueur, rétablissant notamment des protections pour aider à protéger le poisson et son habitat. Afin de mettre en œuvre la Loi modernisée, des outils et des approches modernes de suivi et d'évaluation de la santé ou de l'état du poisson et de son habitat sont nécessaires pour appuyer les activités de réglementation, de planification, de partenariat et de surveillance souples et intégrées du Programme de protection du poisson et de son habitat (PPPH), ainsi que pour démontrer des résultats améliorés en matière de durabilité du poisson et de son habitat.

Un premier avis scientifique sur les outils de cartographie géospatiale, les indicateurs et les mesures de l'habitat du poisson dans la région du Pacifique a été produit en juillet 2022 (MPO 2022). On a examiné les outils géospatiaux accessibles au public qui fournissaient des indicateurs des activités humaines et des menaces pour l'habitat du poisson et les bassins hydrographiques dans la région du Pacifique afin de déterminer de quelle manière ils estimaient, le cas échéant, les éléments des principales menaces pour l'habitat des espèces d'eau douce et des espèces anadromes identifiées par le Comité sur la situation des espèces en péril au Canada (COSEPAC) et gérées par Pêches et Océans Canada (MPO). Les menaces pour l'habitat étaient celles énumérées dans l'Énoncé de politique sur la protection du poisson et de son habitat (MPO 2019a), le document interne Interim Risk Management Guide for the Protection of Fish and Fish Habitat¹ et les documents pertinents du COSEPAC. Les menaces énumérées dans la politique (MPO 2019a) et examinées dans la réponse des Sciences (MPO 2022) étaient les espèces aquatiques envahissantes (EAE), la dégradation de l'habitat, la modification de l'habitat, la pollution et les changements climatiques. Les menaces abordées dans le guide connexe étaient les substances nocives, la sédimentation et la modification ou la perte d'habitat et de végétation aquatiques, l'oxygène dissous (OD), le passage du poisson, les éléments nutritifs et les bandes riveraines. Les recommandations formulées dans le rapport comprenaient d'autres travaux visant à élaborer une approche géospatiale pour rendre compte de l'état de l'habitat du poisson et intégrer une composante temporelle afin d'illustrer les changements au fil du temps (MPO 2022). Ce processus du Secrétariat canadien des avis scientifiques (SCAS) vise à traiter des travaux supplémentaires déterminés.

Le PPPH a demandé à la Direction des sciences d'élaborer une approche géospatiale pour rendre compte de l'état de l'habitat du poisson et de déterminer quels sont les éléments qui peuvent être évalués sur une base temporelle. Les résultats de cette évaluation seront utilisés pour présenter la situation des menaces à l'état de l'habitat du poisson, notamment celles qui sont énumérées dans l'Énoncé de politique sur la protection du poisson et de son habitat (MPO 2019a). Le PPPH a également demandé une analyse spatiale des répercussions croisées des changements climatiques sur le débit et la température des cours d'eau et des menaces liées à l'activité humaine sur les écosystèmes du saumon du Pacifique dans l'unité hydrographique écologique (UHE) de Thompson-Nicola.

Les bassins hydrographiques des rivières Thompson-Shuswap et de la rivière Nicola ont été désignés comme zones pilotes pour la mise en œuvre de la planification intégrée des écosystèmes du saumon (PIES) dans le cadre de l'Initiative de la Stratégie relative au saumon du Pacifique (ISSP), en partenariat avec les organisations autochtones et la province de la

¹ MPO. 2019. (Interim) risk management guide for the protection of fish and fish habitat. Pêches et Océans Canada – Programme de protection du poisson et de son habitat. Document interne.

Colombie-Britannique (C.-B.). Ces processus de planification collaborative visent à déterminer et à prioriser les mesures qui profitent aux écosystèmes du saumon dans ces bassins hydrographiques, tout en tenant compte des répercussions des changements climatiques et des activités humaines. Les résultats de l'analyse spatiale de Thompson-Nicola entreprise dans le cadre de cet examen régional par les pairs du SCAS guideront ces processus.

Comme ces deux demandes ont recours à des méthodes connexes, elles ont été combinées pour un examen uniforme et approfondi. Les menaces évaluées dans le cadre de ce processus (estimées ici en tant qu'exposition; voir plus de détails sur la terminologie dans la section « Renseignements de base ») ont été sélectionnées pour correspondre aux principales menaces incluses dans le document MPO (2022) et en fonction de la faisabilité et des méthodes fondamentales déterminées dans Boyd *et al.* (2022). Les menaces d'origine anthropique évaluées sont les suivantes : espèces aquatiques envahissantes; modification du débit (c.-à-d. modification de l'habitat); destruction de l'habitat dans les cours d'eau (c.-à-d. dégradation de l'habitat); fragmentation latitudinale et longitudinale (c.-à-d. passage du poisson); perturbation du milieu riverain; modifications d'origine humaine des nutriments, pollution et sédimentation. Ces menaces sont présentées sous forme de cotes unitaires et cumulatives des menaces appliquées au bassin du fleuve Fraser (BFF). Les menaces liées aux changements climatiques sont traitées séparément et comprennent les projections des risques d'inondation, les débits faibles des cours d'eau, les débits élevés des cours d'eau et les températures chaudes des cours d'eau. Les menaces énumérées dans la politique et le guide qui échappent actuellement à la portée de l'analyse géospatiale à de vastes échelles spatiales fondées sur les données existantes sont la surexploitation des poissons et des espèces gérées par les provinces, ainsi que les modifications ou pertes de l'habitat et de la végétation aquatiques, l'oxygène dissous, le champ électromagnétique, l'approvisionnement alimentaire, la lumière et le bruit.

L'évaluation et l'avis découlant de ce processus d'examen régional par les pairs du Secrétariat canadien des avis scientifiques (SCAS) serviront à orienter les activités du PPPH dans la région du Pacifique liées à la mise en œuvre de la *Loi sur les pêches* modernisée, en particulier la capacité d'expliquer comment le PPPH travaille à l'élaboration d'indicateurs de l'état ou de la santé de l'habitat dans la région du Pacifique. L'analyse spatiale de Thompson-Nicola guidera les processus de planification collaborative de l'ISSP dans les bassins hydrographiques de Thompson-Nicola.

1.2. RENSEIGNEMENTS DE BASE

Les endroits où le poisson et son habitat sont touchés par les activités humaines et les changements climatiques, ainsi que les façons par lesquelles ils sont touchés constituent des renseignements essentiels nécessaires pour concentrer les ressources sur les mesures de gestion les plus efficaces afin d'aider à préserver les populations. Cependant, il est difficile de cerner l'ampleur des perturbations du paysage et des effets des changements climatiques pour répondre à ces questions en s'appuyant uniquement sur les évaluations traditionnelles sur le terrain. Les progrès réalisés dans les programmes d'analyse spatiale, les données satellitaires et les bases de données accessibles au public ont permis d'estimer les menaces pour le poisson et son habitat sur de grandes échelles spatiales à l'aide d'outils géospatiaux (p. ex. Vörösmarty *et al.* 2010; Halpern *et al.* 2015). En particulier, la reconnaissance du fait que les espèces font face à de nombreuses menaces simultanées a mené à un domaine d'étude des effets cumulatifs (Orr *et al.* 2020) dont l'application utilise des outils géospatiaux pour produire des estimations de ces effets et les cartes correspondantes (Halpern *et al.* 2008a; Halpern et Fujita 2013). Les évaluations des effets cumulatifs cartographient habituellement l'intensité estimée des agents de stress comme première étape, puis appliquent des pondérations de la

vulnérabilité ou de la courbe de réponse aux agents de stress propres à une espèce ou à un type d'habitat pour enfin créer un cumul additif ou multiplicatif des agents de stress dans une cote des effets cumulatifs (Halpern et Fujita 2013; MacPherson *et al.* 2023). Chacune de ces étapes nécessite des estimations et des hypothèses, et l'approche adoptée à cet égard varie grandement d'une application à l'autre (Halpern et Fujita 2013; MPO 2022). L'élaboration et l'amélioration de méthodes d'estimation des différentes menaces et des effets cumulatifs fournissent des renseignements précieux sur les endroits où les ressources sont les plus nécessaires pour mieux gérer et conserver le poisson et son habitat.

La composition d'une évaluation des effets cumulatifs est déterminée par l'accent mis sur une activité humaine ou un agent de stress en particulier, ou sur une composante de l'écosystème (c.-à-d. une espèce ou un type d'habitat). Dans le premier cas, il faut déterminer les effets potentiels d'une activité humaine focale ou d'un agent de stress focal sur toutes les composantes pertinentes de l'écosystème (approche descendante); dans le second, on cherche à déterminer tous les agents de stress et les impacts sur une composante écosystémique focale (approche ascendante; Murray *et al.* 2020). Dans l'évaluation présentée ici, nous avons adopté une approche ascendante dans le but de fournir de l'information pour la gestion et la production de rapports sur l'état du poisson et de son habitat. Les composantes écosystémiques focales sont l'habitat d'eau douce, le saumon du Pacifique anadrome et les espèces de poissons en péril. Les menaces pesant sur ces composantes écosystémiques sont énumérées dans l'Énoncé de politique sur la protection du poisson et de son habitat (MPO 2019a), le guide Interim Risk Management Guide for the Protection of Fish and Fish Habitat¹ et les documents pertinents du COSEPAC (Boyd *et al.* 2022; MPO 2022). Le cadre général de l'évaluation est axé sur la zone, car il détermine les menaces découlant des activités qui se déroulent dans une zone donnée (la région du Pacifique) et entre plusieurs composantes écologiques (Murray *et al.* 2020). Un cumul additif des menaces individuelles dans une cote cumulative des menaces peut être appliqué à l'échelle de la région comme première étape d'une évaluation des effets cumulatifs. Une amélioration plus poussée de l'évaluation des effets cumulatifs consiste à déterminer les pondérations ou les réponses à l'agent de stress propres à des espèces ou à des types d'habitats d'eau douce précis dans la région.

Étant donné l'omniprésence de termes et de définitions différents utilisés dans la recherche sur les effets cumulatifs (Orr *et al.* 2020), il est nécessaire de préciser les termes et les définitions, et par la suite la portée des mesures, utilisés dans une évaluation. Dans certains cas, les agents de stress ont été définis comme toute variable biotique ou abiotique qui génère une réaction biologique positive ou négative (Orr *et al.* 2020; Rosenfeld *et al.* 2022); dans d'autres, ils sont concentrés sur les facteurs humains qui produisent des effets négatifs sur un écosystème (Murray *et al.* 2020). Le terme « effet » peut également être utilisé pour désigner un écart positif ou négatif par rapport à la valeur prévue (Murray *et al.* 2020). Par exemple, une augmentation des éléments nutritifs résultant des activités humaines (l'agent de stress) peut entraîner une diminution de l'OD dans un système (l'effet). Il convient de souligner que cette utilisation du terme « effet » est différente de celle des « effets cumulatifs » – le premier désigne l'écart par rapport à une valeur caractérisant les conditions de l'habitat et le second fait référence à l'impact estimé que l'écart peut avoir sur une composante écosystémique focale. Nous utilisons le terme « menace » ci-après pour créer un cadre qui est largement inclusif et qui correspond au libellé et à la portée des menaces énumérées dans l'Énoncé de politique du PPPH et le guide connexe¹ (MPO 2019a, 2022). Plus précisément, nous utilisons le terme « menace » pour représenter une estimation de l'exposition. Lorsque nous faisons référence aux estimations des éléments nutritifs, de la pollution et de la sédimentation, nous utilisons le terme « charge » pour souligner que ces cotes sont des estimations des intrants d'origine humaine dans le système et qu'elles ne représentent pas l'importance relative ou les divers effets sur les poissons (c.-à-d. que certains polluants sont plus nuisibles que d'autres); il en va

de même pour les autres estimations des menaces, car ces cotes ne comportaient pas de catégories ou de seuils appliqués à cette étape pour déterminer les valeurs qui ont une plus grande incidence sur les poissons. Les mesures des menaces dans cette évaluation étaient axées sur les facteurs humains et pouvaient être biotiques (p. ex. EAE) ou abiotiques (p. ex. sédimentation causée par les routes, mais sans inclure les processus naturels). Les menaces peuvent créer une réponse biologique positive selon le contexte et l'intensité; par exemple, les nutriments dans un système oligotrophe peuvent accroître la production biotique. Toutefois, dans cette évaluation, les menaces ont généralement été considérées comme produisant un effet indésirable, étant donné que l'accent était mis uniquement sur les intrants d'origine humaine qui créent un écart par rapport à l'état naturel.

La première étape de la quantification des effets cumulatifs – l'estimation de l'intensité des menaces – est la récolte de l'information principale nécessaire pour gérer et la présentation de l'état du poisson et de son habitat dans une région. Les méthodes utilisées pour estimer les menaces vont de l'application directe de paramètres de l'activité humaine en tant qu'indicateurs de la menace (p. ex. densité des routes) à l'élaboration de modèles reliant les activités humaines à l'agent de stress ou à l'effet connexe sur le système (p. ex. charges de sédiments provenant de multiples activités humaines; MPO 2022). La première est plus facilement accessible et réalisable, et a donc été produite dans le cadre du [Pacific Salmon Explorer](#) (PSE) pour la majeure partie de la Colombie-Britannique (Fondation du saumon du Pacifique [FSP] 2021). Ces renseignements indiquent les endroits où les activités humaines sont les plus importantes et peuvent être utilisés pour créer des cotes de risque à l'échelle d'un paysage (FSP 2021). Cependant, l'estimation des menaces à l'aide de modèles ou de paramètres mécanistes qui les relient étroitement à des impacts potentiels sur le poisson et son habitat donne des indicateurs qui sont plus directement liés à l'état du poisson et de son habitat – p. ex. la charge sédimentaire par rapport à la densité des routes – et qui sont plus utiles lorsqu'appliqués dans d'autres analyses des effets cumulatifs. Ce niveau d'analyse exige de travailler à cerner toutes les activités humaines et les perturbations du paysage qui influencent une menace et la dépendance au contexte de cette influence. Par exemple, le risque de sédimentation a été estimé par les outils provinciaux de la Colombie-Britannique à l'aide de diverses caractéristiques routières et environnementales, et différentes décisions ont été prises en fonction du contexte de l'influence; en particulier, l'outil [Stewardship Baseline Objectives Tool](#) (SBOT) applique les paramètres de la densité des routes dans un rayon de 100 m d'un cours d'eau et de la longueur des routes sur des pentes de plus de 60 %, mais le protocole Southern Interior Watershed Assessment Protocol (SIWAP; van Rensen *et al.* 2020) utilise une distance de 50 m et des pentes de plus de 50 % (MPO 2022). On voit bien ainsi certains des défis analytiques et des couches de décisions qui peuvent servir à estimer plus en détail les menaces. Une meilleure capacité de quantifier les mécanismes et la dépendance au contexte qui relient les activités humaines aux menaces et, en fin de compte, à l'état du poisson et de son habitat exige des études de terrain à grande échelle. Cependant, il est possible d'utiliser des relations mécanistes simplifiées et généralisées des intrants pour dériver les menaces afin de produire des estimations de premier ordre des niveaux des menaces sur de grandes étendues spatiales qui fournissent des renseignements utiles pour la planification, l'établissement des priorités et la gestion.

Le sens du débit qui peut transporter et accumuler des intrants des zones en amont dans les habitats en aval, et la contribution du ruissellement de surface au transport des intrants terrestres dans l'eau douce sont un facteur fondamental de l'estimation des menaces pour le poisson et son habitat en eau douce. Pour les outils géospatiaux pertinents qui couvrent la C.-B., ces aspects n'ont pas été abordés ou ont été traités avec des degrés de complexité différents (MPO 2022). Une méthode pour traiter les intrants terrestres consiste à déterminer la superficie des terres qui se déversent dans un système lorsqu'on délimite l'étendue spatiale des

activités humaines qui peuvent avoir un effet (FSP 2021) et une autre méthode cherchant à déterminer les effets des estimations du débit a produit des estimations aux points d'écoulement des bassins hydrologiques afin d'englober les activités en amont (Linke *et al.* 2019). Une approche plus complexe pour tenir compte de l'accumulation en aval dans un réseau de cours d'eau a relevé les activités humaines dans un bassin hydrologique et cumulé leurs contributions à la direction de l'écoulement (Vörösmarty *et al.* 2010; Boyd *et al.* 2022); la dilution des intrants a ensuite été estimée à l'aide des estimations du débit des cours d'eau (Vörösmarty *et al.* 2010) ou de la superficie du bassin hydrologique comme substitut du débit (Boyd *et al.* 2022). À ce jour, c'est l'[Outil d'inventaire des polluants affectant les baleines et leurs proies](#) (OIPABP) qui a quantifié le plus directement les contributions du ruissellement de surface, à l'aide de coefficients fondés sur la documentation pour l'utilisation des terres, les intrants des catégories de terrains et les taux de ruissellement modélisés (Environnement et Changement climatique Canada [ECCC] 2022). Il est important de poursuivre l'élaboration de méthodes qui intègrent explicitement les aspects de l'accumulation du débit, de la dilution et du ruissellement de surface pour affiner l'estimation des menaces qui ne sont pas uniquement localisées dans la nature (p. ex. la pollution s'écoule vers l'aval, mais les perturbations du milieu riverain sont propres à l'emplacement).

L'avis scientifique qui a déjà été fourni sur les outils de cartographie géospatiale et les indicateurs de l'habitat du poisson reposait sur 13 outils accessibles au public qui couvraient la région du Pacifique (MPO 2022). Ces outils présentaient diverses forces et faiblesses sur les plans de leur portée spatiale, de leur résolution, des menaces traitées et des méthodes utilisées pour estimer les menaces. Les [Rapports sur les bassins versants](#) du Fonds mondial pour la nature (WWF) – Canada se sont classés au premier rang parmi les outils selon la série de critères évalués pour déterminer leur applicabilité à la production de rapports sur l'état du poisson et de son habitat (MPO 2022). Toutefois, pour la production de rapports, cet outil a utilisé des sous-aires de drainage, qui sont vastes (p. ex. le bassin du fleuve Fraser compte quatre sous-aires de drainage), et s'est concentré sur cinq menaces; l'une des menaces mesurées était les changements climatiques, en utilisant la température de l'air et les précipitations comme substituts des conditions de l'eau. On a finalement déterminé qu'il fallait disposer d'un outil amélioré, conçu dans le but de produire des rapports sur l'état du poisson et de son habitat et d'évaluer les effets cumulatifs sur l'habitat du poisson, ainsi que pour tenir compte des changements au fil du temps (MPO 2022). L'intégration des forces des outils existants, ainsi que les développements récents des données spatiales dans la région du Pacifique, ont permis de faire progresser cette exigence. L'élaboration d'une première analyse des menaces cumulatives pour la vallée du Fraser, en Colombie-Britannique (Boyd *et al.* 2022), a fourni le point de départ de ce nouvel outil, qui est présenté ici dans une version améliorée et élargie appliquée à l'étendue du bassin du fleuve Fraser (BFF). La plupart des ensembles de données utilisés pour élaborer les menaces estimées dans cet outil sont disponibles pour la plus grande partie de la C.-B. afin que l'outil puisse être élargi davantage dans les prochaines itérations. Certaines applications de l'outil sont également présentées pour l'UHE de Thompson-Nicola afin de commencer à répondre aux besoins d'information pour le classement par ordre de priorité et la planification de la restauration des zones riveraines, les allocations de prélèvement d'eau et l'atténuation des obstacles dans le contexte des changements climatiques et des valeurs du saumon (unités de conservation [UC] et habitat de fraie favorable modélisé).

1.3. OBJECTIFS

Les objectifs précis de ce document de travail sont les suivants :

Partie I : Indicateurs et paramètres de la cartographie géospatiale de l'habitat du poisson dans le bassin du fleuve Fraser

-
1. Élaborer des méthodes pour estimer neuf menaces d'origine anthropique (espèces aquatiques envahissantes; modification du débit [c.-à-d. modification de l'habitat]; destruction de l'habitat des cours d'eau [c.-à-d. dégradation de l'habitat]; fragmentation latitudinale et longitudinale [c.-à-d. passage du poisson]; perturbation du milieu riverain; modifications d'origine humaine des nutriments, pollution et sédimentation) et appliquer les estimations unitaires et cumulatives des menaces aux tronçons de cours d'eau dans l'ensemble du BFF comme modèle pour étendre les évaluations des menaces à toute la région.
 2. Élaborer et compiler les quatre estimations des menaces liées aux changements climatiques (débit faible et élevé des cours d'eau, températures estivales des cours d'eau et risque d'inondation) et les appliquer aux tronçons de cours d'eau dans l'ensemble du BFF.
 3. Déterminer le chevauchement des menaces d'origine anthropique et des menaces liées aux changements climatiques avec l'habitat essentiel des espèces aquatiques inscrites sur la liste de la *Loi sur les espèces en péril* (LEP), les unités désignables (UD) du saumon évaluées par le COSEPAC comme étant menacées ou en voie de disparition, et d'autres unités de conservation du saumon dans le bassin. Déterminer la contribution relative de chaque menace à chaque habitat.
 4. Évaluer et démontrer, dans la mesure du possible, la capacité de réévaluer les menaces sur une base temporelle en fonction des données actuelles disponibles.
 5. Examiner et déterminer les incertitudes et les limites des données et des méthodes, y compris les menaces qui ne sont pas abordées dans le présent document. Déterminer la capacité et les limites de l'application de la méthodologie au reste de la région du Pacifique.

Partie II : Étude de cas de Thompson-Nicola

1. Appliquer les menaces d'origine anthropique et liées aux changements climatiques élaborées dans les objectifs 1 et 2 à l'UHE de Thompson-Nicola, afin de déterminer les niveaux de menace connexes pour les populations de saumons (c.-à-d. les unités de conservation) et les écosystèmes du saumon (c.-à-d. les tronçons de cours d'eau). Mettre en évidence celles qui présentent le plus de risques en fonction de l'estimation des menaces.
2. Fournir des exemples initiaux d'applications des cotes des menaces qui peuvent servir à guider les activités de classement par ordre de priorité de la restauration dans l'UHE. Les combiner avec les cotes d'habitat de fraie favorable à l'environnement (Iacarella et Weller 2023) et les unités de conservation délimitées, le cas échéant, pour indiquer les endroits où les niveaux élevés des menaces estimées correspondent à un habitat potentiellement important pour le saumon. Mettre l'accent sur les menaces et les activités humaines qui peuvent être atténuées par des mesures de restauration et de gestion :
 - a. les perturbations du milieu riverain où les intrants de nutriments, de pollution ou de sédimentation provenant des activités humaines et les perturbations du paysage sont estimés comme étant élevés;
 - b. les allocations de permis de prélèvement d'eau lorsque le débit est faible dans les conditions actuelles et futures projetées;
 - c. les obstacles au passage en amont qui bloquent un habitat potentiellement important pour la fraie du saumon.

2. MÉTHODES

2.1. ZONE D'ÉTUDE

Le BFF (240 000 km²) est le plus grand bassin de la Colombie-Britannique, représentant le quart de la province (figure 1). Le fleuve Fraser coule sur 1 375 km sur un grand dénivelé de 3 950 m jusqu'au niveau de la mer (Déry *et al.* 2012). Il rencontre un éventail de conditions climatiques, avec des températures annuelles moyennes de l'air de 0,5 °C dans le nord à 7,5 °C dans le sud de l'intérieur, et des précipitations moyennes de 400 à 800 mm/an dans le plateau intérieur à plus de 3 000 mm/an dans les zones côtières et montagneuses (Déry *et al.* 2012). Le BFF soutient 3 millions de personnes, soit près des deux tiers des Britanno-Colombiens².

L'utilisation des terres comprend l'exploitation minière, la foresterie, l'agriculture, l'élevage de bétail et l'urbanisation. Le BFF est un habitat essentiel pour de nombreuses espèces en péril³ et a toujours été le plus grand producteur de saumon rouge (*Oncorhynchus nerka*) au monde et un important producteur de saumon chinook (*O. tshawytscha*), de saumon kéta (*O. Keta*), de saumon coho (*O. kisutch*), de saumon rose (*O. gorbuscha*) et de truite arc-en-ciel (*O. mykiss irideus*; MPO 1998).

L'UHE de Thompson-Nicola (56 000 km²) constitue un quart du BFF en tant que l'une des quatre sous-aires de drainage du bassin (figure 1). Elle couvre des parties des régions de ressources naturelles de [Cariboo](#) et de [Thompson-Okanagan](#). Ces régions ont connu d'importantes perturbations environnementales ces dernières années, notamment des feux de forêt, des inondations et des infestations de ravageurs forestiers. Renforcer la résilience des régions aux changements climatiques est une préoccupation majeure.

² Conseil du bassin du Fraser. [About the Basin](#).

³ MPO. [Place prioritaire des bassins versants du Fraser et du Columbia](#).

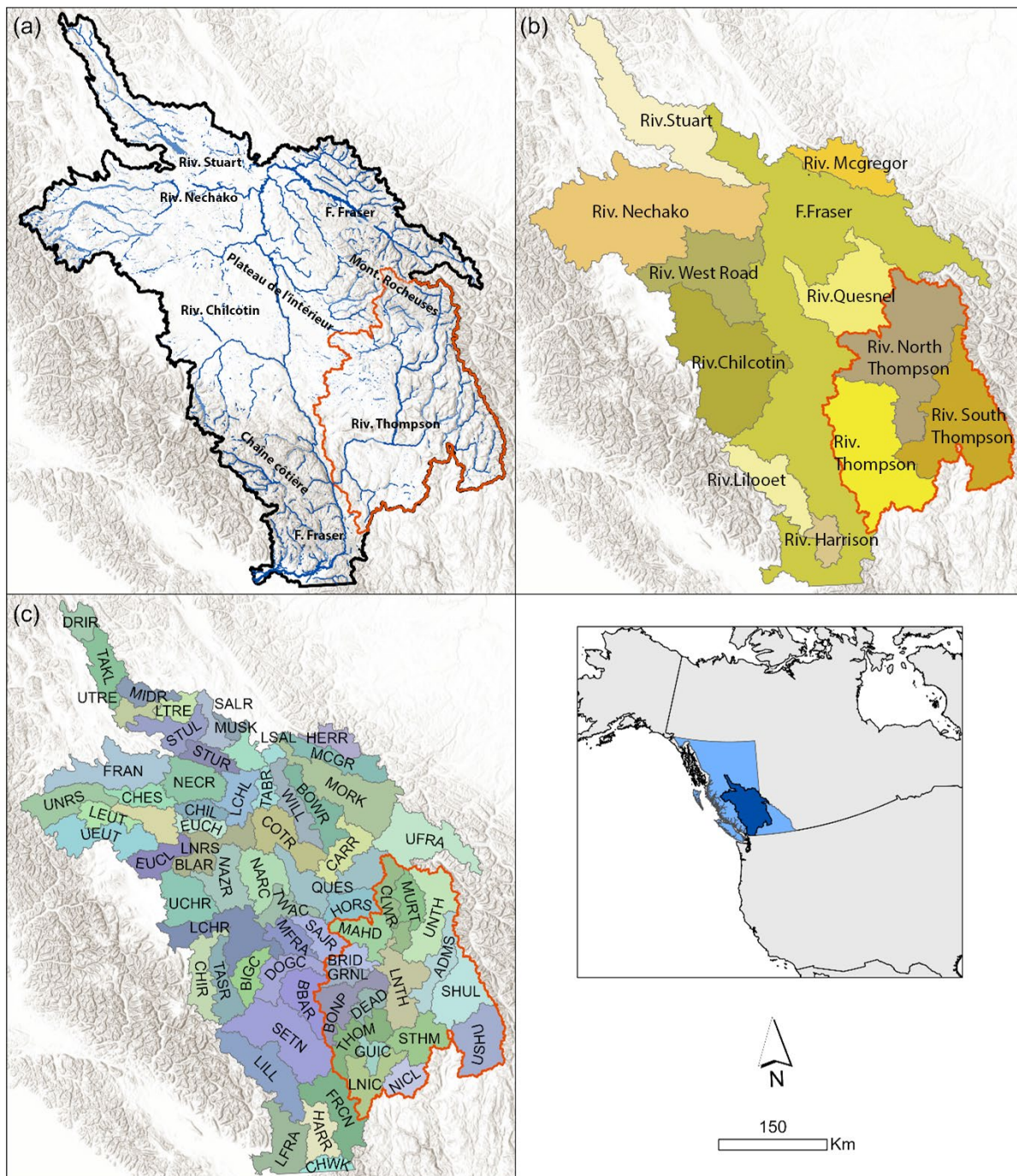


Figure 1. Étendue du bassin du fleuve Fraser (a; contour noir) et de l'unité hydrographique écologique de Thompson-Nicola (a; contour orange) en Colombie-Britannique, au Canada (polygone bleu clair sur la carte de l'Amérique du Nord). Les principaux cours d'eau et principales caractéristiques topographiques sont décrits sur le graphique a), les principaux bassins hydrographiques sur le graphique b) et les groupes de bassins hydrographiques sur le graphique c). Les abréviations des groupes de bassins hydrographiques (« codes ») sont indiquées dans le tableau A1 de l'annexe A.

2.2. COMPOSANTES ÉCOSYSTÉMIQUES FOCALES

La composante écosystémique de base pour cette évaluation était l'ensemble des tronçons de cours d'eau (longueur moyenne = 422 m, plage = 0,1 à 9 208 m) délimités par le Freshwater Atlas de la Colombie-Britannique (FWA; GeoBC 2011) à une échelle de 1:20 000 dans le BFF. Les espèces focales étaient celles qui sont inscrites sur la liste de la *Loi sur les espèces en péril* et les cinq espèces de saumons du Pacifique (saumon chinook, saumon kéta, saumon coho, saumon rose et saumon rouge). Nous avons identifié huit espèces de poissons en péril qui utilisaient l'habitat dans le BFF. Les UC de saumon ont été classées selon le statut de risque (espèce préoccupante, menacée ou en voie de disparition) évalué par le COSEPAC en février 2024 (annexe B, tableau B1). La truite arc-en-ciel n'a pas été incluse à l'heure actuelle, car elle n'a été désignée ni comme espèce en péril, ni comme l'une des cinq espèces de saumons du Pacifique; toutefois, il serait intéressant de l'inclure dans les évaluations futures, car les populations du BFF ont été évaluées par le COSEPAC comme étant en voie de disparition. Nous avons également exclu les espèces côtières dont l'utilisation de l'habitat d'eau douce est mal connue, comme l'eulakane (*Thaleichthys pacificus*). Les espèces incluses étaient les suivantes : omble à tête plate (*Salvelinus confluentus*), saumon chinook (18 UC au total, 15 en péril), saumon kéta 1 UC), chabot de la chaîne côtière (*Cottus aleuticus*), saumon coho (7 UC au total, 5 en péril), esturgeon vert (*Acipenser medirostris*), meunier des montagnes (*Catostomus platyrhynchus*), naseux de Nooksack (*Rhinichthys cataractae* ssp.), saumon rose (2 UC au total), meunier de Salish (*Catostomus* sp. cf. *catostomus*), saumon rouge (25 UC au total, 16 en péril), truite fardée versant de l'ouest (*O. clarkii lewisi*) et esturgeon blanc (*Acipenser transmontanus*, 2 UD).

Nous avons cartographié les cours d'eau importants pour les espèces en péril en utilisant l'information sur la répartition ou la fraie selon l'espèce et les données disponibles (Boyd *et al.* 2022; figure 2). Nous avons utilisé les couches spatiales des polygones de répartition des espèces fournies par le Programme sur les espèces en péril du MPO pour le chabot de la chaîne côtière, l'esturgeon vert, le meunier des montagnes, le naseux de Nooksack, le meunier de Salish et la truite fardée versant de l'ouest. Pour l'esturgeon blanc, nous avons utilisé trois sources de données afin de tenir compte de l'utilisation importante de l'habitat pour les UD menacées (bas Fraser) et en voie de disparition (haut Fraser), notamment les polygones de fraie pour l'UD du bas Fraser produits par l'outil [SBOT](#); un polygone délimité à partir d'une grappe d'observations pour la population du moyen Fraser (UD du haut Fraser) à l'aide des données du site [Fisheries Inventory Data Queries](#) (FIDQ) de la Colombie-Britannique; et les polygones de répartition provenant du MPO pour le reste de l'UD du haut Fraser. Seules les données du FIDQ étaient disponibles pour l'omble à tête plate; nous avons utilisé les observations propres aux emplacements des populations indiquées dans les documents du COSEPAC (rivière Ryan, ruisseau Ure, rivière Lillooet, rivière Pitt, lac Chilliwack, lac Birkenhead, rivière Birkenhead et lac Chehalis). L'étendue de l'habitat des espèces de saumons a été délimitée en fonction de l'étendue de leurs UC. Toutes ces délimitations de l'habitat ont ensuite été associées aux tronçons de cours d'eau du réseau.

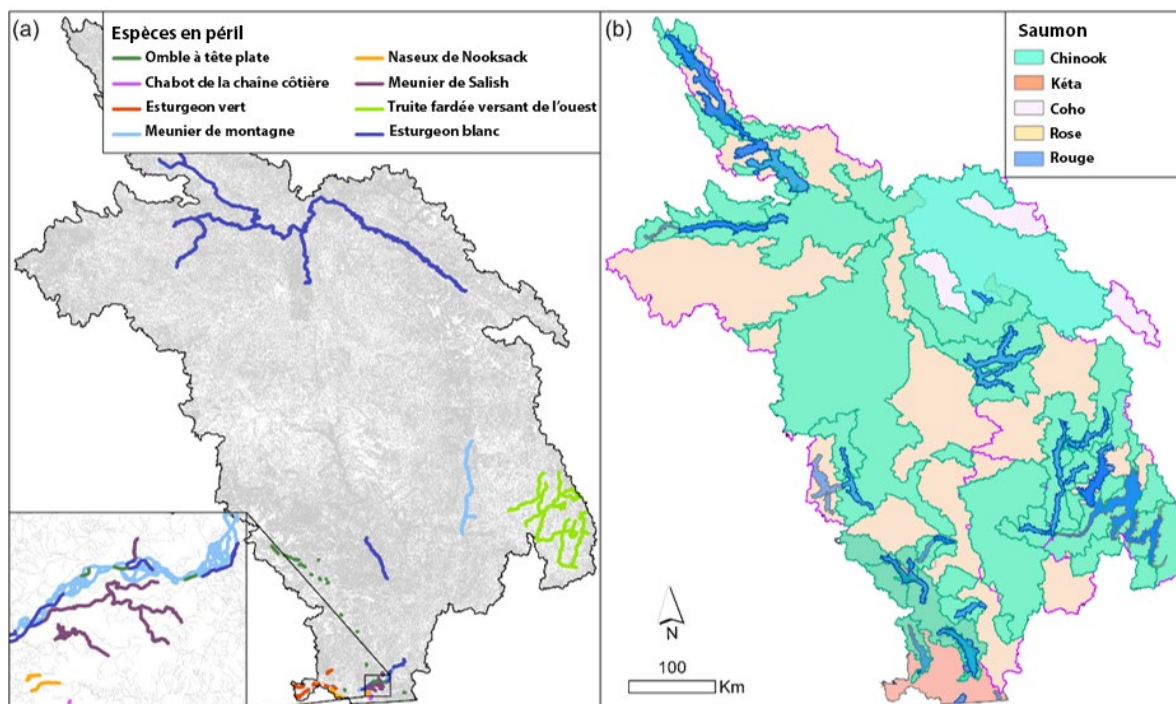


Figure 2. Composantes écosystémiques focales de l'analyse des menaces cumulatives. Comprend (a) le réseau de cours d'eau complet pour le bassin du fleuve Fraser (panneau de gauche, lignes grises), l'habitat de cours d'eau délimité pour les espèces de poisson en péril et (b) les unités de conservation du saumon du Pacifique et celles désignées comme préoccupantes, menacées ou en voie de disparition (« en péril ») par le COSEPAC (contours codés par couleur; à noter que les UC du saumon coho couvrent l'ensemble du BFF).

2.3. ESTIMATION DES MENACES

Les menaces incluses à des fins d'estimation ont été compilées à partir des sources suivantes :

1. le document de politique du PPPH (MPO 2019a) et le guide connexe¹;
2. l'élaboration initiale de l'outil dans la vallée du Fraser, en Colombie-Britannique (Boyd *et al.* 2022);
3. un examen des rapports d'évaluation et de situation du COSEPAC pour chaque espèce nouvellement ajoutée (annexe B, tableau B1).

Nous avons exclu les menaces pour lesquelles il n'y avait pas ou peu d'information géospatiale (surexploitation des poissons et des espèces gérées par les provinces et changements ou pertes d'habitat aquatique et de végétation, OD, champ électromagnétique, sources de nourriture, lumière et bruit). Les neuf menaces évaluées liées à l'activité humaine et aux perturbations étaient les espèces aquatiques envahissantes (EAE), la modification du débit, la destruction de l'habitat dans les cours d'eau, la fragmentation latitudinale, la fragmentation longitudinale (séparément pour les espèces anadromes et résidentes), la perturbation du milieu riverain, les nutriments d'origine humaine, la pollution et la sédimentation d'origine humaine (figure 3). Les menaces liées aux changements climatiques ont été traitées séparément dans la cotation cumulative des menaces et comprenaient les changements prévus dans les risques d'inondation, dans les débits faibles des cours d'eau, dans les débits élevés des cours d'eau et dans les températures chaudes des cours d'eau. Nous avons axé cette évaluation sur les menaces d'origine humaine et les intrants connexes pour aider à déterminer les mesures de

gestion qui pourraient être nécessaires (il convient de souligner que les feux de forêt et la défoliation par les ravageurs forestiers ont été considérés comme étant d'origine humaine, car ils sont tous deux influencés par les activités humaines, y compris par les changements climatiques). De ce fait, l'évaluation n'englobe pas toutes les pressions auxquelles les espèces préoccupantes peuvent être confrontées (p. ex. la prédation par les espèces indigènes, la sédimentation causée par les processus naturels).

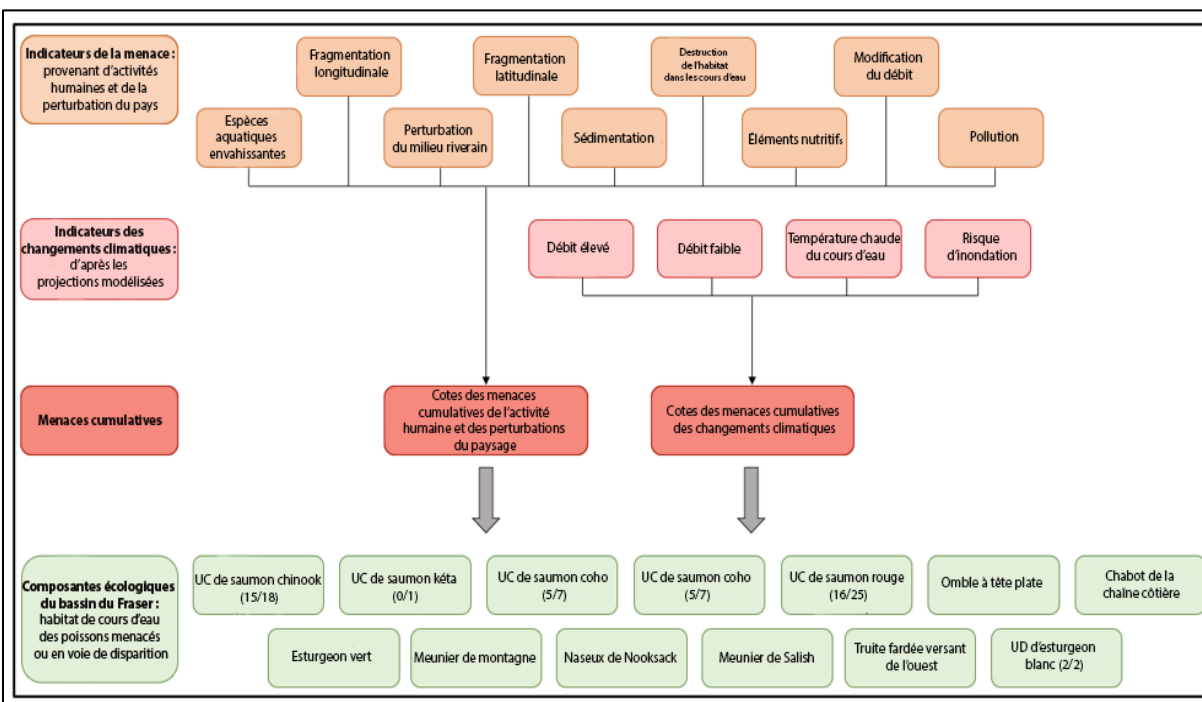


Figure 3. Cadre d'évaluation des menaces cumulatives pour le poisson et son habitat dans le bassin du fleuve Fraser, en Colombie-Britannique. Les parenthèses pour les espèces focales indiquent le nombre d'unités désignables (UD) définies pour les espèces en péril ou les unités de conservation (UC) du saumon qui sont préoccupantes, menacées ou en voie de disparition sur le nombre total dans le bassin.

Les menaces ont été évaluées pour chaque tronçon de cours d'eau à l'intérieur du BFF (un « tronçon » a été défini comme une section continue du cours d'eau entre deux jonctions, ou une jonction et une source/sortie du cours d'eau). Les caractéristiques de la couverture terrestre et de l'utilisation des terres ont été résumées et attribuées aux tronçons de cours d'eau selon les bassins hydrographiques fondamentaux du FWA, qui représentent le bassin hydrographique local d'un tronçon de cours d'eau (annexe A, figure A1). Pour les menaces accumulées par le débit (éléments nutritifs, pollution et sédimentation), nous avons utilisé un ensemble de données élargi pour rendre compte des parties du BFF hors de la C.-B. et tenir compte des intrants en amont de l'ensemble du bassin hydrologique (GeoBC 2011; Weller *et al.* 2023). Les bassins hydrographiques fondamentaux du FWA modifiés ont été utilisés pour la perturbation du milieu riverain et la destruction de l'habitat afin de représenter la surface de l'eau et les zones riveraines des tronçons de cours d'eau individuels dans les grands cours d'eau. Nous avons utilisé le réseau complet de cours d'eau du FWA pour toutes les menaces, sauf les températures des cours d'eau, qui ont été modélisées pour les bassins hydrologiques d'une superficie minimale de 1 km² (Weller *et al.* 2023). Nous avons tenu compte des rives des lacs pour calculer les menaces de la destruction de l'habitat dans les cours d'eau et de la perturbation du milieu riverain, mais nous n'avons pas inclus les lacs dans la cote finale des

menaces en raison de leurs caractéristiques hydrologiques différentes. Les exigences relatives à l'inclusion de données et de modèles pour estimer les menaces étaient les suivantes :

1. une couverture spatiale sur l'ensemble du BFF;
2. des renseignements normalisés à l'échelle du BFF;
3. une résolution applicable aux tronçons de cours d'eau;
4. accessible au public.

Une vaste couverture spatiale et des renseignements normalisés étaient particulièrement importants pour que les cotes de menace ne soient pas pondérées de façon inégale dans l'ensemble du BFF en fonction de l'information disponible. Toutes les analyses spatiales et la cartographie ont été effectuées à l'aide d'ArcGIS Pro (ESRI Inc., version 2.9.8) et le codage a été effectué dans Python (Python Software Foundation 2023) et dans R (R Development Core Team 2022).

2.3.1. Menaces liées aux activités humaines et aux perturbations du paysage

Les menaces ont été calculées à partir d'une série de données spatiales sur les activités humaines et les perturbations du paysage. Les activités humaines et les perturbations du paysage utilisées pour chaque menace ont été choisies en fonction :

1. d'autres outils géospatiaux existants pour la C.-B. (MPO 2022),
2. d'une recherche documentaire sur les contributions humaines aux menaces (Boyd *et al.* 2022) et
3. de la disponibilité des données.

Des diagrammes des séquences des effets sont fournis pour chacune de ces menaces, comme dans MPO (2022). Toutes les valeurs des menaces ont été transformées par $\log_{10}(x+1)$ ou par la racine du cube ($x^{1/3}$), selon la transformation qui produisait un coefficient d'asymétrie du moment de Fisher plus faible. La transformation des cotes avant la normalisation crée une pondération plus équivalente entre les cotes qui sont fondées sur différentes plages de valeurs (Halpern *et al.* 2008b). Les cotes ont ensuite été mises à l'échelle de 0 à 1 selon la formule $z_i = (x_i - \min(x))/\max(x) - \min(x)$, où z_i est la valeur normalisée, x_i est la i^{e} valeur dans l'ensemble de données, $\min(x)$ est la valeur minimale dans l'ensemble de données et $\max(x)$ est la valeur maximale dans l'ensemble de données. Les cotes des menaces individuelles et cumulatives ont été générées pour chaque tronçon du réseau du FWA pour le BFF.

2.3.1.1. Détails généraux sur les données

Les couches des activités humaines et de la perturbation du paysage qui étaient représentées sous forme de cellules de grille (urbaines, agricoles et parcours naturel) étaient à une résolution de 10 m (annexe C, tableau C1). D'autres couches de données étaient représentées sous forme d'intrants vectoriels (points, polygones et polygones), qui étaient soit rastérisés à une résolution correspondante de 10 m et résumés par unité du bassin hydrographique fondamental (pour la destruction de l'habitat dans les cours d'eau, la perturbation du milieu riverain, les éléments nutritifs, la pollution et la sédimentation), soit appliqués au réseau du FWA en tant que vecteurs et résumés par tronçon du cours d'eau (pour les EAE, la modification du débit, la fragmentation latitudinale et la fragmentation longitudinale; annexe C, tableau C1). Les matrices ont été appliquées selon la présence-absence. La couche des blocs de coupe forestière combine les données sur la récolte forestière provenant de sources multiples, mais ne comprend pas les réserves forestières (p. ex. zones tampons riveraines et arbres fauniques) ou les zones non coupées dans l'empreinte d'un bloc de coupe. Pour la défoliation par les

ravageurs forestiers, nous avons inclus les insectes forestiers et les agents pathogènes, et exclu les dommages causés par les animaux (p. ex. les ours) et les facteurs abiotiques (p. ex. les feux). Seuls les niveaux « graves » et « très graves » de défoliation par les ravageurs forestiers ont été utilisés pour déterminer la présence d'intrants dans la menace des nutriments, car les infestations de ravageurs ont tendance à accroître l'exportation de nutriments dans les cours d'eau lorsque la végétation est limitée et que la décomposition dominante des arbres morts est prédominante (Hélie *et al.* 2005). Tous les niveaux de gravité ont été inclus pour les perturbations du milieu riverain, car cette menace n'est pas propre à la fonction riveraine, et les niveaux de défoliation par les parasites ont probablement une influence différente sur les fonctions riveraines (p. ex. perte d'ombrage par rapport à perte de la fonction de filtrage). Pour déterminer la présence de parcours naturels, nous avons utilisé uniquement les cellules de la grille de l'ensemble de données sur la couverture terrestre et l'utilisation des terres qui chevauchent les surfaces en prairie désignées dans les calculs des menaces (l'ensemble de données sur la couverture terrestre et l'utilisation des terres applique une définition plus large des parcours naturels qui comprend les feux et d'autres perturbations).

2.3.1.2. Espèces aquatiques envahissantes

Une définition commune des espèces aquatiques envahissantes est une espèce qui a été introduite à l'extérieur de son habitat naturel et qui peut nuire à l'environnement, à l'économie ou à la société (Commissioner of the Environment and Sustainable Development 2019). Les espèces aquatiques envahissantes peuvent avoir des effets sur le poisson et son habitat par divers mécanismes, notamment la prédation, la concurrence pour les ressources, le transfert de maladies et la modification de l'habitat, selon leur position trophique (Gallardo *et al.* 2016). Le terme « espèce non indigène » est plus large et sert à désigner les espèces qui ne sont pas indigènes dans la région, quelle que soit leur incidence. De nombreuses espèces non indigènes peuvent ne pas avoir d'effets détectables, ou leur incidence peut ne pas être observée avant un certain temps après l'invasion (Crooks 2005). Cependant, on a constaté que la présence de plusieurs espèces non indigènes a souvent facilité leur probabilité de survie ou leurs répercussions écologiques (Braga *et al.* 2018), ce qu'on appelle une « invasion catastrophique » (Simberloff et Von Holle 1999). Les espèces indigènes peuvent également avoir des effets prédateurs ou concurrentiels qui peuvent nuire aux espèces préoccupantes sur le plan de la conservation; cet effet a été considéré comme hors de la portée des menaces d'origine humaine, mais il pourrait constituer une limite supplémentaire au rétablissement des populations en péril.

Nous avons utilisé la richesse en espèces non indigènes comme paramètre général de la menace des EAE, car les espèces indigènes peuvent être touchées de façon différente et il existe un manque de connaissances détaillées sur les répercussions des espèces non indigènes au Canada (Commissioner of the Environment and Sustainable Development 2019; figure 4). Nous avons utilisé les observations d'espèces aquatiques non indigènes après 1980 à partir d'une base de données compilée qui comprenait 130 espèces de plantes (n = 89), d'algues (n = 1), de poissons (n = 29), d'amphibiens (n = 3), d'invertébrés (n = 6) et de reptiles (n = 2); (annexe C, tableau C1). Il est peu probable que les emplacements ponctuels des espèces aquatiques non indigènes correspondent à toute leur étendue en C.-B., c'est pourquoi nous avons créé des polygones de répartition autour des emplacements ponctuels à l'aide d'une méthode de regroupement fondée sur la distance avec un rayon de recherche de 10 km (figure 5). Nous avons ensuite dénombré les espèces uniques dans chaque bassin hydrographique fondamental à partir de la présence de polygones de répartition ou d'un emplacement ponctuel périphérique pour obtenir la richesse en espèces aquatiques non indigènes. Nous avons ensuite remis ces valeurs à l'échelle de 0 à 1 et les avons appliquées à

chaque tronçon de cours d'eau, 0 indiquant aucune présence estimée d'espèces non indigènes et 1 dénotant le nombre le plus élevé d'espèces non indigènes.

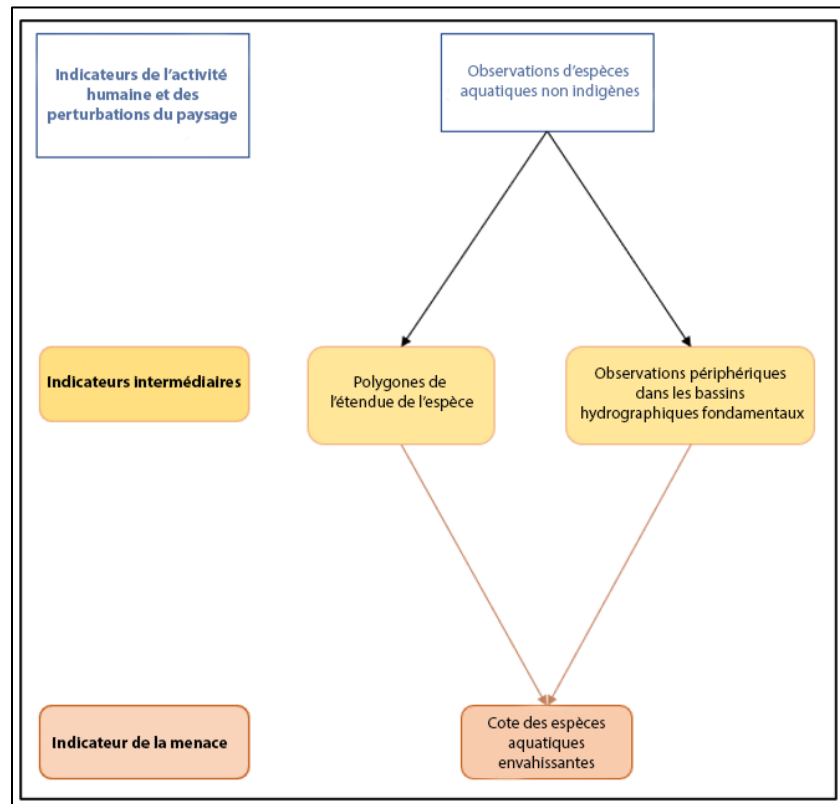


Figure 4. Diagramme des séquences des effets de la menace des espèces aquatiques envahissantes.

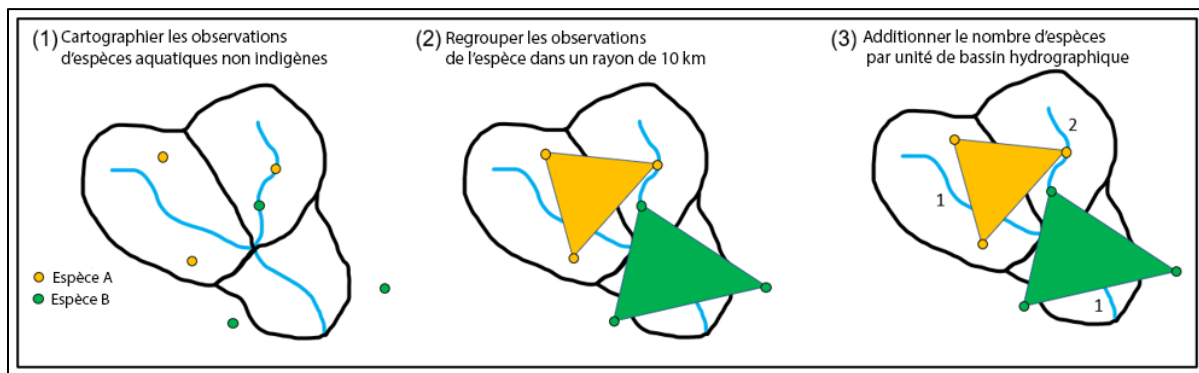


Figure 5. Méthode de calcul de la cote de la menace des espèces aquatiques envahissantes à partir de la richesse en espèces aquatiques non indigènes.

2.3.1.3. Modification du débit

La modification du débit est une forme de modification de l'habitat qui suscite une attention accrue en raison des préoccupations liées à des débits dangereusement faibles pour les poissons dans des conditions liées aux changements climatiques (Brice *et al.* 2021). Cette cote était axée sur trois sources principales de modification du débit : l'extraction d'eau et les barrages en raison de leur potentiel de modifier la quantité d'eau, et les ponceaux en raison de

leur potentiel de modifier la vitesse d'écoulement dans les passages restreints (Merrill 2005; Graf 2006; figure 6).

Nous avons inclus les permis d'extraction d'eau actifs, les barrages actifs (tous, quel que soit l'état de l'obstacle) et les ponceaux dans chaque bassin hydrographique fondamental pour cette menace. Les cotes ont été calculées pour chacune de ces activités humaines séparément en fonction des valeurs mises à l'échelle dans l'ensemble du BFF, puis additionnées pour obtenir une cote finale. Les permis d'extraction d'eau ont été mis à l'échelle en fonction de l'extraction d'eau maximale autorisée, les barrages l'ont été en fonction de leur hauteur et les ponceaux, en fonction de leur densité dans chaque bassin hydrographique fondamental. Ainsi, une pondération semblable a été attribuée à chaque activité, mais en fonction de ses propres valeurs relatives dans l'ensemble du BFF. Nous avons ensuite appliqué les cotes de la modification du débit pour chaque unité du bassin hydrographique fondamental à leur tronçon de cours d'eau correspondant. Une cote de 0 indiquait qu'aucune modification du débit n'avait été estimée d'après l'extraction d'eau, les barrages et les ponceaux, et une cote de 1 indiquait la plus grande modification du débit estimée résultant de ces activités. L'annexe D (figure D1) présente les cartes des cotes distinctes pour la modification du débit en fonction du changement de la quantité d'eau et du changement de la vitesse du débit.

Les futures itérations pourraient tenir compte d'approches et d'intrants supplémentaires pour cette menace. Par exemple, les permis d'extraction d'eau correspondent généralement à des cours d'eau à débit plus élevé (voir l'exemple à la figure 60a) et peuvent être mis à l'échelle en fonction du débit du cours d'eau. L'approche actuelle sans mise à l'échelle donne une cote plus élevée aux permis ayant des allocations de prélèvement plus élevées, mais ces dernières n'ont pas toujours un effet plus important sur l'eau si elles correspondent à de plus grands cours d'eau. Les permis d'utilisation d'eau incluaient également ceux qui sont délivrés à des fins de conservation et pourraient être exclus lors de futures itérations, car ils peuvent avoir un effet positif sur l'habitat du poisson; toutefois, les détails sur l'objet du permis de conservation n'étaient pas fournis dans l'ensemble de données. Un autre facteur est l'effet en amont et en aval des barrages et de l'extraction d'eau sur le débit. Par exemple, les barrages hydroélectriques peuvent modifier les conditions d'écoulement vers l'aval à plus de 100 km (Ferencz *et al.* 2019). Nous n'avons pas de lien généralisé entre les taux de décroissance et la distance par rapport aux barrages, mais un développement plus poussé est justifié. De plus, les perturbations forestières, en particulier l'exploitation forestière, la défoliation par les ravageurs et les feux, modifient également le débit des cours d'eau. Les événements de remplacement des peuplements (coupe à blanc ou feu de forêt grave) augmentent souvent le débit des cours d'eau à court terme en raison d'une diminution nette de l'évapotranspiration du couvert forestier, mais les faibles débits saisonniers ont tendance à diminuer sur de plus longues périodes (15 à 25 ans après la récolte) avec la croissance de l'étage supérieur du couvert et l'augmentation de l'évapotranspiration (Coble *et al.* 2020; Goeking et Tarboton 2020). Bon nombre des études examinées à ce sujet sont tirées de pratiques forestières historiques qui ne conservent pas de zones tampons riveraines; les études sur les réactions du débit aux pratiques forestières avec rétention des zones tampons ont révélé des résultats variables, et plus de recherches sont nécessaires pour déterminer les mécanismes généraux (Coble *et al.* 2020). De même, les perturbations qui ne remplacent pas les peuplements ont eu des effets très variables sur le débit en fonction de l'évapotranspiration du sous-étage restant (Goeking et Tarboton 2020). Les perturbations forestières peuvent être incluses dans le calcul futur de la menace de la modification du débit, bien que les ensembles de données actuellement utilisés pour la récolte forestière et les feux de forêt ne contiennent pas d'information sur l'intensité des perturbations (la défoliation par les ravageurs inclut les cotes d'intensité).

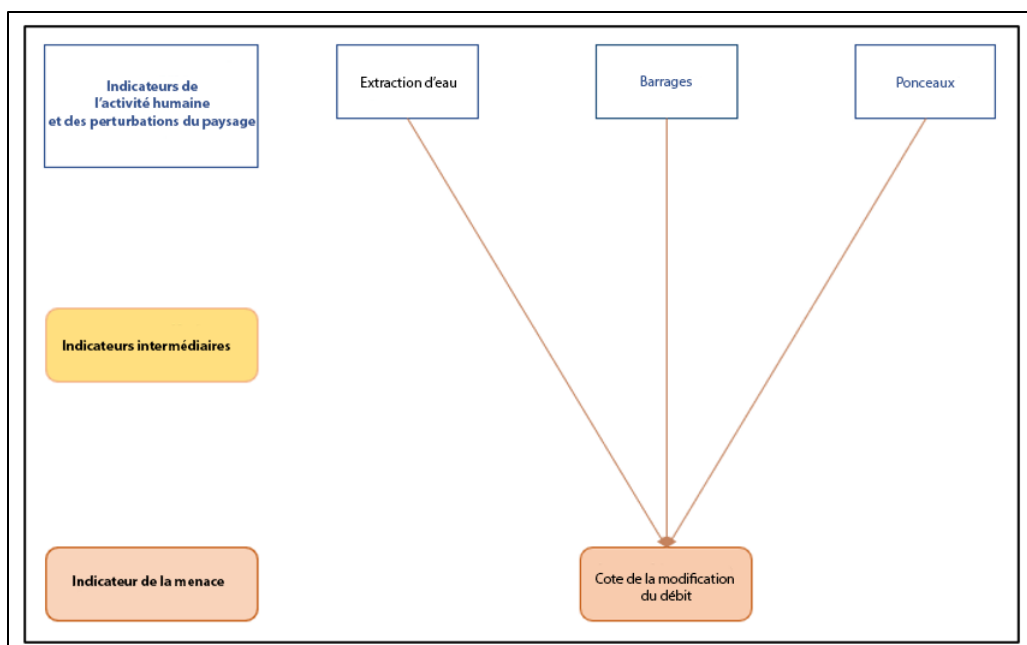


Figure 6. Diagramme des séquences des effets de la menace de la modification du débit.

2.3.1.4. Destruction de l'habitat dans les cours d'eau

La destruction de l'habitat des cours d'eau est une mesure de la dégradation de l'habitat propre au cours d'eau. Nous avons tenu compte des activités humaines qui chevauchaient une matrice du réseau de cours d'eau ou une matrice de la superficie du lac comme potentiel de dégradation directe de l'habitat d'eau douce (figure 7). Nous avons également inclus les activités minières à moins de 30 m de l'eau douce, car les mines peuvent nuire à l'habitat dans les cours d'eau en raison des infrastructures bâties, ainsi que des activités minières directes dans un cours d'eau (Nener et Wernick 1997). Par exemple, l'agrégat (sable, gravier et roche) extrait des lits de cours d'eau, en particulier le long du fleuve Fraser, est un produit minier principal en Colombie-Britannique (Rosenau et Angelo 2000). Le dragage du sable pour la navigation dans les chenaux et les travaux de construction est également répandu, surtout le long du bas Fraser (Rosenau et Angelo 2000); cependant, les données géospatiales sur le dragage n'étaient pas disponibles. Les ponceaux ont des effets directs dans les cours d'eau, et les passages à niveau sans ponceaux sont en grande partie des ponts dont les piles et les murs de soutènement peuvent avoir des impacts dans les cours d'eau, tout comme la circulation ou les trains au-dessus du cours d'eau. L'inclusion des ponceaux a permis de tenir compte de nombreux franchissements de cours d'eau, de sorte que toutes les cellules de la grille des ponceaux ont été retirées des matrices des routes et des lignes ferroviaires lorsqu'il y avait chevauchement. Les terres privées n'ont pas été incluses comme couche distincte de l'activité humaine et de la perturbation du paysage pour calculer la menace de la destruction de l'habitat dans les cours d'eau. La perturbation dans les terres privées a été capturée par plusieurs autres couches (p. ex. utilisation des terres urbaines, récolte forestière). Les terres privées n'ont pas été prises en compte au-delà de ces couches, car il n'y avait pas de données spatiales plus précises sur les activités humaines et les perturbations dans les terres privées.

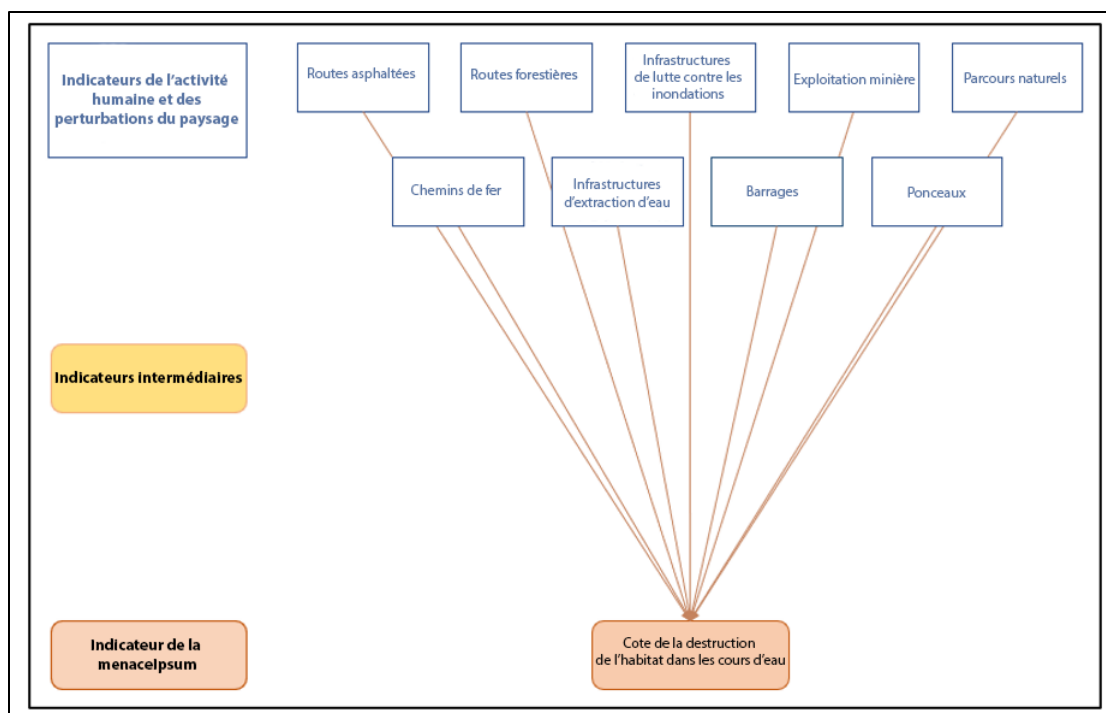


Figure 7. Diagramme des séquences des effets de la menace de la destruction de l'habitat dans les cours d'eau.

Pour évaluer la destruction de l'habitat, nous avons produit une matrice de perturbation binaire en combinant toutes les matrices d'activité pertinentes. L'empreinte du réseau de cours d'eau et des lacs a ensuite été rastérisée et utilisée comme masque pour n'inclure que les cellules perturbées dans la surface du cours d'eau. La cote de la menace a été calculée en fonction de la proportion de l'empreinte dans le cours d'eau qui était perturbée (figure 8). Une cote de 0 indique qu'aucune partie de l'empreinte du cours d'eau n'a été estimée perturbée, et une cote de 1 indique que toute l'empreinte du cours d'eau a été considérée comme perturbée.

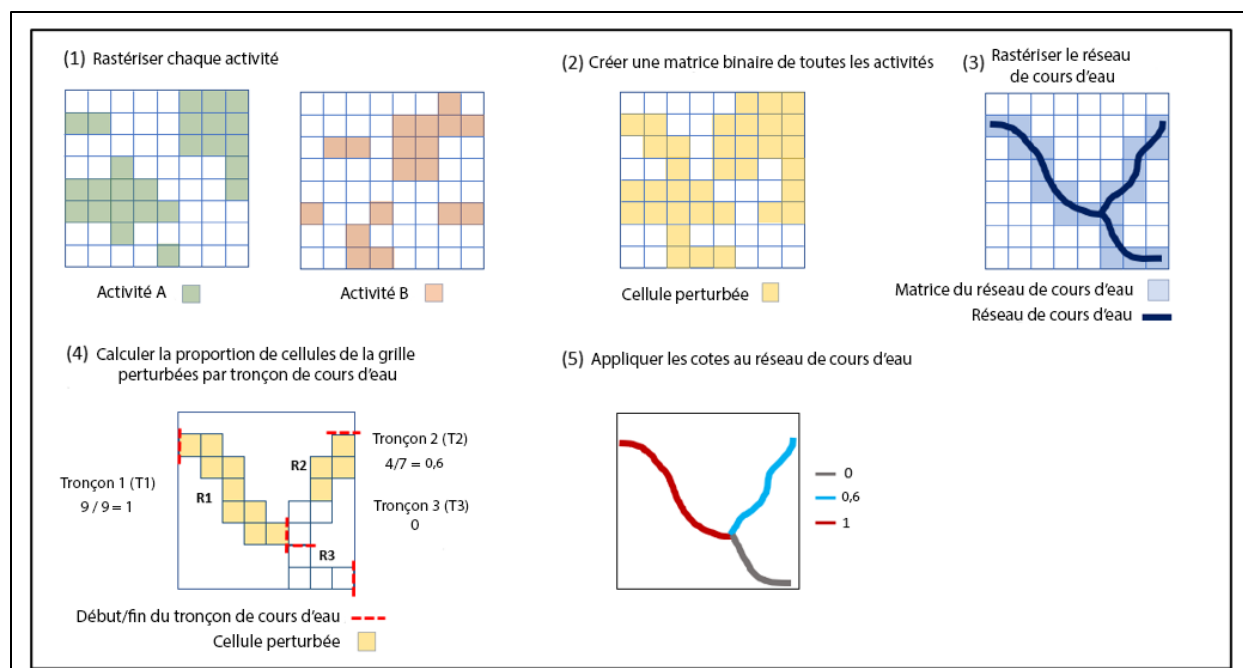


Figure 8. Calcul de la menace de la destruction de l'habitat dans les cours d'eau.

2.3.1.5. Fragmentation latitudinale

La cote de la menace de la fragmentation latitudinale tenait compte de la présence d'infrastructures de lutte contre les inondations (digues et protection des berges) qui pourraient bloquer le passage du poisson vers l'habitat de plaine inondable (figure 9). L'habitat de plaine inondable est important pour la croissance et l'hivernage des salmonidés juvéniles (Brown 2002). Afin de déterminer la fragmentation de chaque tronçon de cours d'eau, nous avons créé des transects perpendiculaires espacés de 150 m et s'étendant sur 500 m de chaque côté des cours d'eau du réseau (figure 10). Les infrastructures de lutte contre les inondations à moins de 500 m du réseau de cours d'eau ont été détectées à partir des intersections entre les transects et les polygones des infrastructures. Nous avons choisi 500 m comme distance de recherche entre les cours d'eau et les infrastructures de lutte contre les inondations d'après une inspection visuelle de la distance nécessaire pour tenir compte de la structure connexe sans l'étendre jusqu'aux infrastructures associées aux cours d'eau avoisinants. Des longueurs de transect différentes peuvent être nécessaires pour appliquer cette méthode à d'autres bassins; une approche pourrait consister à mettre à l'échelle les longueurs de transect en fonction de l'ordre des cours d'eau (c.-à-d. la taille des cours d'eau) et à appliquer des transects plus petits aux ordres de cours d'eau inférieurs. Lorsqu'un transect croisait une infrastructure de lutte contre les inondations des deux côtés d'un cours d'eau, nous avons appliqué une cote de 1, nous avons appliqué une cote de 0,5 lorsqu'il la croisait sur un côté, et une cote de 0 s'il n'y avait aucun croisement. S'il y avait plusieurs transects pour un tronçon de cours d'eau et qu'ils avaient des cotes différentes, nous avons attribué la cote maximale. Les tronçons de cours d'eau qui chevauchaient des zones urbaines ont également reçu une cote de 1, dénotant l'absence totale de lien avec l'habitat de plaine inondable.

Cette cote serait améliorée en tenant compte de l'étendue de l'habitat de plaine inondable rendu inaccessible. Cependant, les plaines inondables sont généralement continues le long du réseau de cours d'eau, et il est difficile de délimiter la superficie de la plaine inondable associée à un tronçon de cours d'eau donné. Ce calcul est plus facile sur le plan informatique lorsque l'on se concentre sur l'habitat de plaine inondable lui-même, délimité en tant que polygones

spatiaux (c.-à-d. des unités distinctes) et que l'on détermine le blocage de cet habitat en tant qu'unité focale (Rebellato *et al.* 2022).

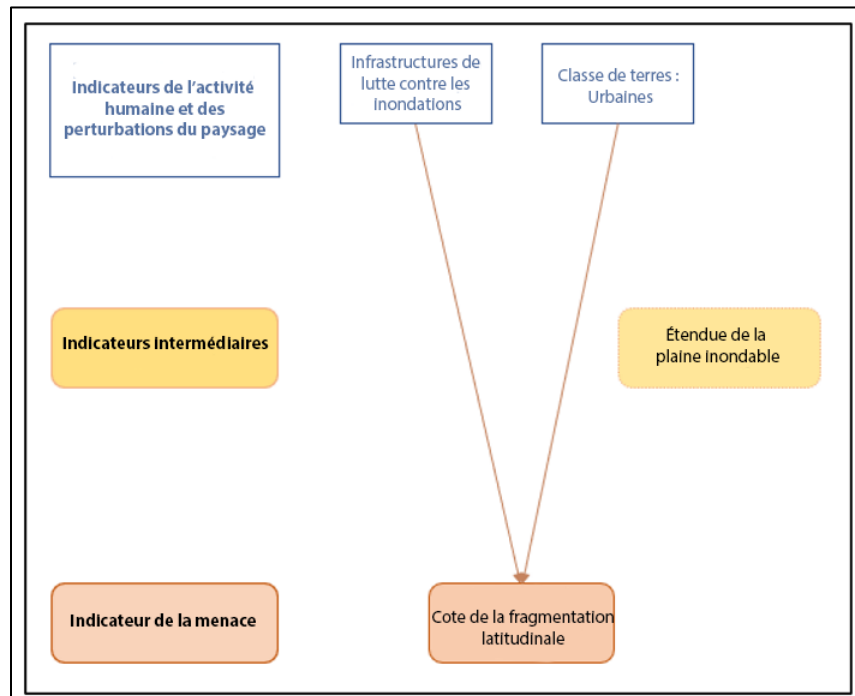


Figure 9. Diagramme des séquences des effets de la menace de la fragmentation latitudinale. L'étendue de la plaine inondable n'a pas été incluse dans la cote, mais elle est indiquée comme contexte important pour la cote.

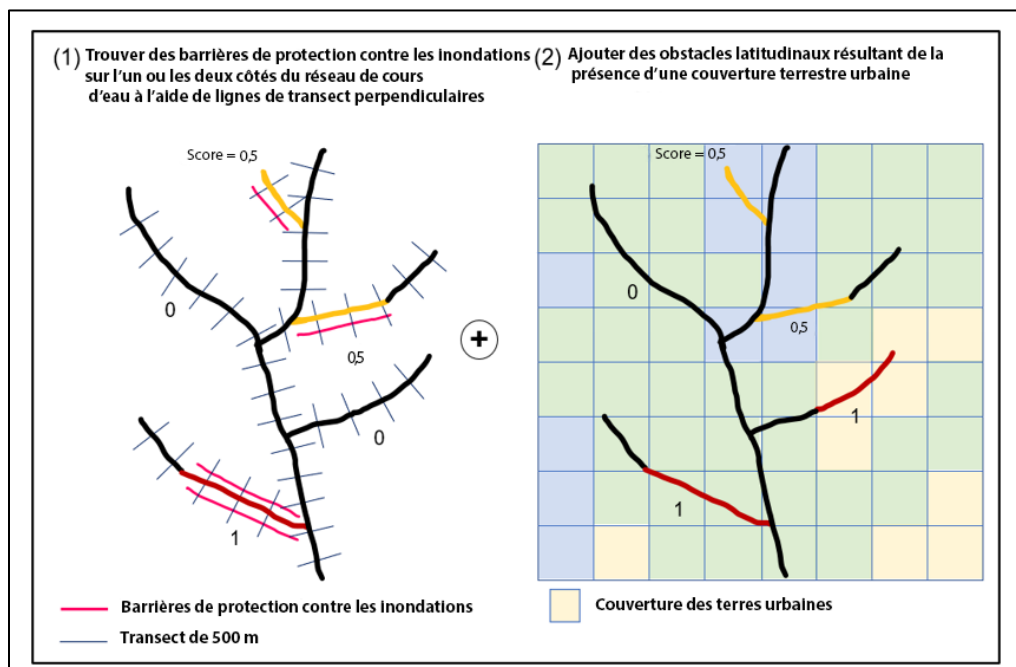


Figure 10. Méthode utilisée pour déterminer l'association des obstacles à l'habitat de plaine inondable.

2.3.1.6. Fragmentation longitudinale

La fragmentation longitudinale représente les obstacles au passage du poisson en amont et en aval. Nous avons délimité la fragmentation longitudinale séparément pour les espèces résidentes et les espèces anadromes, car les espèces résidentes peuvent accéder à l'habitat en amont des obstacles, à condition qu'elles soient déjà présentes, tandis que les espèces anadromes ont besoin d'un passage libre pour aller à l'océan et en revenir. Nous avons inclus les barrages considérés comme des obstacles complets comme une source de fragmentation longitudinale d'origine humaine; ces barrages ont été définis comme des structures qui empêchent les poissons de se déplacer en amont⁴. Nous avons également tenu compte des obstacles naturels, c'est-à-dire les chutes d'eau de 5 m de hauteur ou plus, les écoulements souterrains, les autres obstacles importants comme les canyons et les tronçons de cours d'eau avec des gradients > 15 % (gradient inclus seulement pour la fragmentation pour les espèces anadromes; (Rebellato *et al.* 2022; figure 11).

Les ponceaux des franchissements de cours d'eau par les voies ferrées, les routes et les sentiers créent également de nombreux obstacles pour les poissons dans l'ensemble du BFF (Rebellato *et al.* 2022). Par exemple, on a estimé que 282 passages à niveau dans le BFF bloquaient 1 015 km d'habitat de fraie et de croissance potentiel des salmonidés anadromes (Rebellato *et al.* 2022). Cependant, tous les franchissements ne créent pas des obstacles; 81 % des 18 000 traversées de routes à fond fermé se sont révélées des obstacles au passage du poisson en Colombie-Britannique (Mount 2017). Les évaluations des ponceaux qui créent des obstacles complets, partiels ou inexistantes sont en cours (Rebellato *et al.* 2022). Les barrages indiqués comme des obstacles partiels (p. ex. en raison de la présence d'échelles à poisson) peuvent également bloquer complètement le passage, selon des facteurs comme les niveaux de débit et les espèces. De plus, les faibles débits et les déconnexions saisonnières des cours d'eau peuvent constituer des obstacles importants qui n'ont pas encore été pris en compte. Nous avons choisi de n'inclure que les obstacles connus comme étant des blocages complets comme première étape pour représenter leur contribution aux menaces pesant sur le poisson et son habitat dans l'ensemble du BFF. De ce fait, les cotes de la fragmentation longitudinale ne représentent pas complètement les obstacles au passage des espèces résidentes et anadromes. Nous recommandons d'inclure dans les évaluations visant à guider les activités d'étude sur le terrain les barrages considérés comme des obstacles partiels et les ponceaux qui sont évalués comme des obstacles ou qui n'ont pas encore été évalués afin d'évaluer les blocages potentiellement importants pour le passage en vue de les atténuer ou de les retirer. En particulier, la Fédération canadienne de la faune dirige des évaluations géospatiales et des relevés sur le terrain en C.-B. axés sur la détermination des obstacles importants au passage du poisson pour les efforts d'atténuation et de retrait. Elle a également mis au point d'autres méthodes d'évaluation de la fragmentation longitudinale et latitudinale (Rebellato *et al.* 2022), comme la détermination des avantages du retrait d'une série d'obstacles (N. Mazany-Wright, Fédération canadienne de la faune, comm. pers.), qu'il serait utile d'explorer pour effectuer une évaluation détaillée de ces menaces.

⁴ Fédération canadienne de la faune. Catalogue de données.

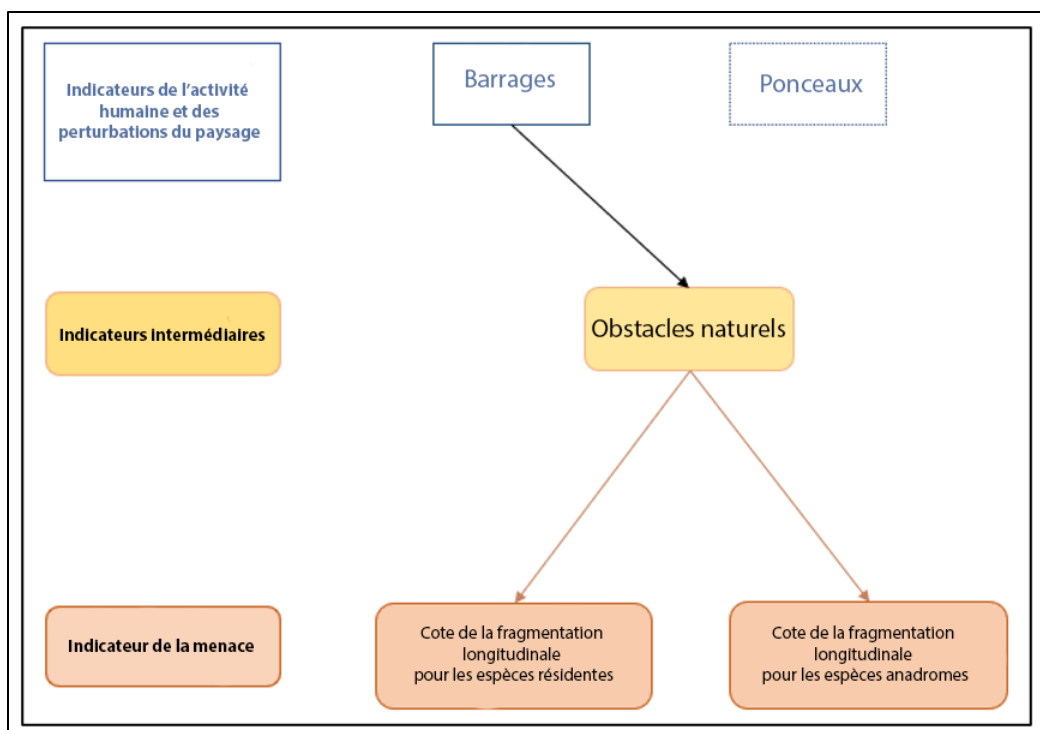


Figure 11. Diagramme des séquences des effets de la menace de la fragmentation longitudinale. Seuls les barrages considérés comme des obstacles complets ont été inclus dans cette évaluation, bien que des obstacles partiels puissent également bloquer complètement le passage. Les ponceaux n'ont pas encore été inclus pour le BFF, car ils n'ont pas été entièrement évalués comme blocages, mais on sait qu'ils créent des milliers d'obstacles en C.-B. et qu'ils constituent un facteur important pour l'estimation future de la menace.

Pour les espèces résidentes, la fragmentation longitudinale était axée sur l'étendue de l'habitat entre les obstacles, les plus petites étendues d'habitat étant plus nocives pour une population. La fragmentation longitudinale pour les espèces résidentes a donc été calculée comme la longueur du réseau de cours d'eau accessible à partir de chaque tronçon de cours d'eau (la « zone de nage »; Vörösmarty *et al.* 2010). Nous avons divisé le réseau de cours d'eau aux emplacements des obstacles (barrages formant un obstacle complet et obstacles naturels) dans un rayon de 50 m des tronçons (pour tenir compte de l'erreur de position entre les coordonnées de l'obstacle et du cours d'eau), puis nous avons regroupé tous les tronçons qui étaient reliés entre les obstacles (figure 12). Nous avons ensuite mesuré la longueur totale des tronçons connectés dans chaque parcelle du réseau de cours d'eau. Nous avons calculé les cotes de manière à ce que les cours d'eau qui n'étaient bloqués que par des obstacles naturels et qui n'avaient aucun lien avec les barrages reçoivent une note de 0, car nous nous intéressions aux contributions humaines aux menaces. À cette fin, nous avons d'abord attribué aux parcelles de cours d'eau qui ne sont pas associées à un barrage une longueur connectée de la longueur maximale de la parcelle + 1. Nous avons ensuite transformé et mis à l'échelle les longueurs des parcelles (x) et pris $1 - x$. La note finale était plus proche de 1 pour les tronçons de cours d'eau avec moins de longueur accessible (c.-à-d. les parcelles plus petites) en raison au moins en partie de la présence de barrages, plus proche de 0 pour les tronçons de cours d'eau avec plus de longueur accessible, et de 0 pour les cours d'eau bloqués uniquement par des obstacles naturels. Les barrages associés à des cotes élevées des cours d'eau (c.-à-d. des parcelles plus petites) pourraient être une priorité pour les mesures d'atténuation axées sur les espèces résidentes.

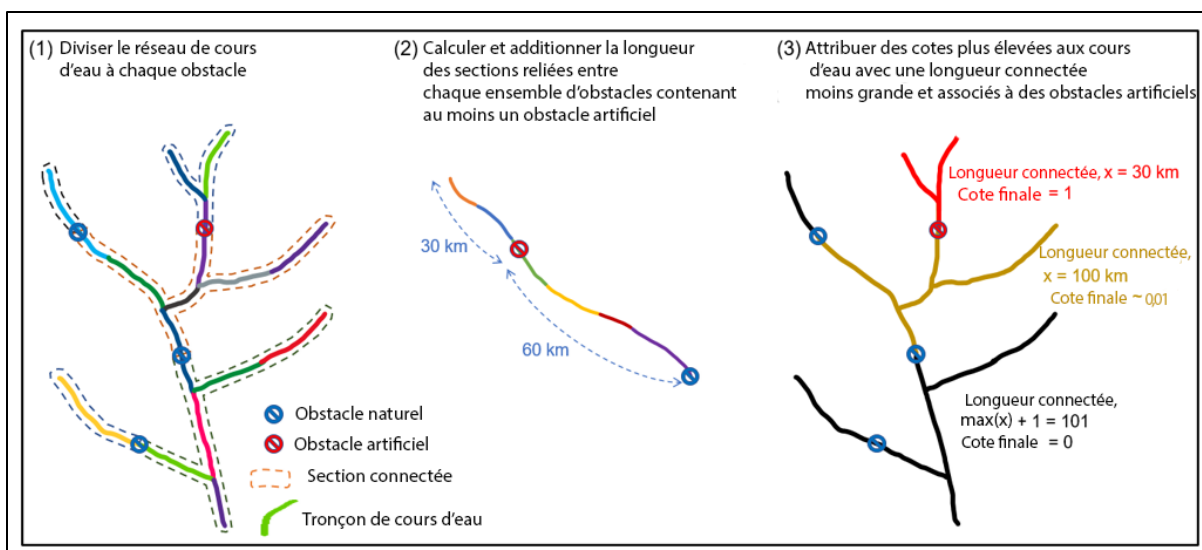


Figure 12. Fragmentation longitudinale pour les espèces résidentes en fonction de la longueur du cours d'eau accessible entre les barrages et les obstacles naturels.

Pour les espèces anadromes, la fragmentation longitudinale était différente de celle des espèces résidentes et axée sur le sens de la migration. Cette cote était fondée sur la première présence d'un barrage (« barrage initial ») qui bloquait le passage depuis l'océan, les barrages qui bloquaient les plus grandes étendues d'habitat étant plus importants pour les espèces anadromes. Nous avons d'abord divisé le réseau de cours d'eau aux barrages et aux obstacles naturels dans un rayon de 50 m, comme pour la fragmentation des espèces résidentes (figure 12). Toutes les sections de cours d'eau situées en amont d'un obstacle naturel ont reçu une note de 0, indépendamment de la taille de la parcelle ou de la présence de barrages ou d'obstacles naturels plus loin. Ces cours d'eau seraient naturellement inaccessibles aux espèces anadromes, tandis que la cote reposait sur la fragmentation d'origine humaine. La cote de la fragmentation a été calculée comme la longueur totale du réseau de cours d'eau (c.-à-d. la taille de la parcelle) bloquée par un barrage initial, jusqu'au point du prochain barrage, obstacle naturel ou du cours supérieur vers l'amont. Cette cote a ensuite été appliquée à toutes les parties en amont du réseau de cours d'eau. Les parcelles créées par les barrages en amont des barrages initiaux (le 2^e barrage, etc.) n'ont pas été notées séparément, car le barrage initial est celui qui a actuellement une incidence sur la migration anadrome et qui doit d'abord être atténué avant que les mesures ciblant le prochain ensemble de barrages ne présentent des avantages pour les espèces anadromes. De futures itérations peuvent éliminer ces barrages initiaux si le passage est restauré, puis effectuer l'évaluation avec un nouvel ensemble de barrages initiaux. Nous avons remis ces valeurs à l'échelle de 0 à 1, de sorte qu'un tronçon de cours d'eau ayant une cote de 0 se trouvait en aval d'un barrage initial ou en amont d'un obstacle naturel initial; les sections de cours d'eau dont une plus grande longueur était bloquée par un barrage initial avaient des cotes plus proches de 1. Ce système de cotation met en évidence les barrages initiaux qui bloquent le passage anadrome vers la plus grande quantité d'habitats en amont (qui peuvent être limités plus loin en amont par davantage de barrages ou d'obstacles naturels).

Une autre méthode consiste à calculer la longueur totale du réseau de cours d'eau bloquée par des barrages successifs (mais en aval des obstacles naturels) pour une quantité totale de cours d'eau qui n'est plus accessible aux espèces anadromes. Cette approche mettrait l'accent sur la portée complète de la menace pour l'habitat du poisson, ce qui correspond à l'évaluation globale de la menace cumulative, mais pourrait réduire la capacité d'orienter les réponses de

gestion possibles en fonction de la faisabilité d'aborder plusieurs barrages en même temps. C'est pourquoi, pour cette itération, nous avons choisi d'appliquer une cote qui combine l'accent mis sur la menace pour l'habitat du poisson et les conséquences plus réalisables pour la gestion.

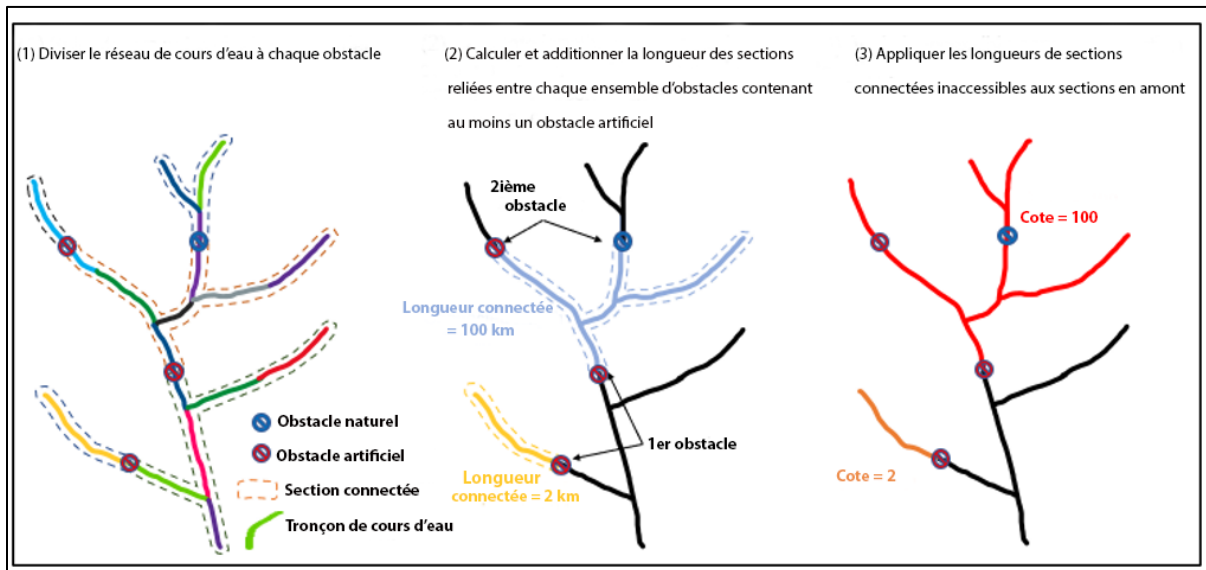


Figure 13. Fragmentation longitudinale pour les espèces anadromes fondée sur la longueur du cours d'eau bloquée en amont des barrages initiaux.

2.3.1.7. Perturbation du milieu riverain

Les zones riveraines sont des zones de transition entre les écosystèmes terrestres et aquatiques qui assurent d'importantes fonctions écosystémiques (Quinn *et al.* 2020). Elles influent sur la morphologie des cours d'eau, l'apport de bois et les températures des cours d'eau, et filtrent l'excès d'éléments nutritifs, la pollution et la sédimentation (Quinn *et al.* 2020). Nous avons utilisé un rayon de 30 m depuis la bande riveraine pour délimiter la zone tampon riveraine conformément aux normes réglementaires en vigueur en Colombie-Britannique (Riparian Areas Protection Regulation 2019, BC Reg 178/2019 s. 8; MPO 2020). Quatre des principales couches de données utilisées pour estimer les perturbations du milieu riverain comportaient des séries chronologiques (utilisation des terres et couverture terrestre, feux de forêt, blocs de coupe forestière et défoliation par les ravageurs forestiers; figure 14). Nous avons utilisé l'année la plus récente disponible pour l'utilisation des terres et la couverture terrestre (2022) et les 10 à 11 dernières années disponibles pour les ensembles de données sur les forêts (feux : de 2012 à 2023; blocs de coupe forestière : de 2012 à 2022; défoliation par les ravageurs : de 2012 à 2022; Boyd *et al.* 2022); nous avons choisi d'inclure l'année la plus récente disponible pour les feux de forêt, mais nous avons conservé la même année de début (2012) pour correspondre aux autres ensembles de données sur la foresterie. Nous avons choisi un seuil d'inclusion prudent de 10 à 11 ans pour les intrants liés aux forêts en fonction de la documentation pertinente, qui suggère un retour des éléments nutritifs et de la sédimentation aux niveaux antérieurs dans les 6 ans suivant la perturbation des forêts (Jewett *et al.* 1995; Hélie *et al.* 2005; Silins *et al.* 2014; Palviainen *et al.* 2015; Nasirzadehdizaji et Akyuz 2022). Ce seuil était directement utile pour notre calcul de la charge en éléments nutritifs, de la pollution et de la charge sédimentaire (voir la section « Éléments nutritifs, pollution et sédimentation : Calculs de l'accumulation du débit »). Cependant, on ne prévoit pas que les zones tampons riveraines perturbées redeviendront pleinement fonctionnelles en une décennie. En particulier,

la modélisation de la fonction riveraine de l'apport de gros débris ligneux dans les cours d'eau a fait apparaître un pic après 70 ans de repousse pour les feuillus et des augmentations pendant au moins 100 ans après la repousse des conifères (Beechie *et al.* 2000). Une évaluation exhaustive des perturbations du milieu riverain inclurait plusieurs délais d'évaluation afin de tenir compte d'autres fonctions importantes (Quinn *et al.* 2020).

Nous avons utilisé un rayon de 30 m depuis la bande riveraine pour délimiter la zone tampon riveraine conformément aux normes réglementaires en vigueur en Colombie-Britannique (Riparian Areas Protection Regulation 2019, BC Reg 178/2019 s. 8; MPO 2020). Les données d'entrée comprenaient toutes les empreintes spatiales accessibles au public des activités humaines le long des zones tampons riveraines dans le BFF. La couverture terrestre urbaine a capté de multiples types de perturbations dans les zones tampons, y compris diverses installations de transformation (p. ex. usines de pâtes et papiers). La couverture terrestre urbaine et les empreintes forestières englobaient également de nombreuses perturbations qui peuvent se produire sur des terres privées. Certaines parties du sud de la Colombie-Britannique et de l'île de Vancouver sont assujetties au règlement provincial sur la protection des zones riveraines (*Riparian Areas Protection Regulation*) pour les activités résidentielles, commerciales et industrielles pratiquées à moins de 30 m de l'eau douce, qui exige des marges de recul des zones riveraines pour l'aménagement, à moins qu'une évaluation environnementale ne juge que le développement ne nuira pas à l'habitat riverain du poisson (ministère des Forêts, des Terres et de l'Exploitation des ressources naturelles 2016). Des activités menées à l'intérieur des zones riveraines sur les terres privées qui ne sont pas assujetties à ce règlement (p. ex. les bassins hydrographiques du nord du BFF) pourraient ne pas être prises en compte.

Nous avons utilisé un processus semblable pour calculer la menace de la perturbation du milieu riverain et celle de la destruction de l'habitat dans les cours d'eau. Nous avons produit une matrice binaire de la perturbation en combinant toutes les matrices pertinentes de l'activité humaine et de la perturbation du paysage (figure 14). Nous avons ensuite rastérisé les zones tampons riveraines du réseau de cours d'eau et des lacs et les avons utilisées comme masque pour n'inclure que les cellules perturbées situées dans un rayon de 30 m. La cote de la menace a été calculée comme la proportion de l'empreinte de la zone tampon riveraine qui a été perturbée, une cote de 0 indiquant qu'il n'y a pas de perturbation et une cote de 1 correspondant à 100 % de perturbation (figure 15).

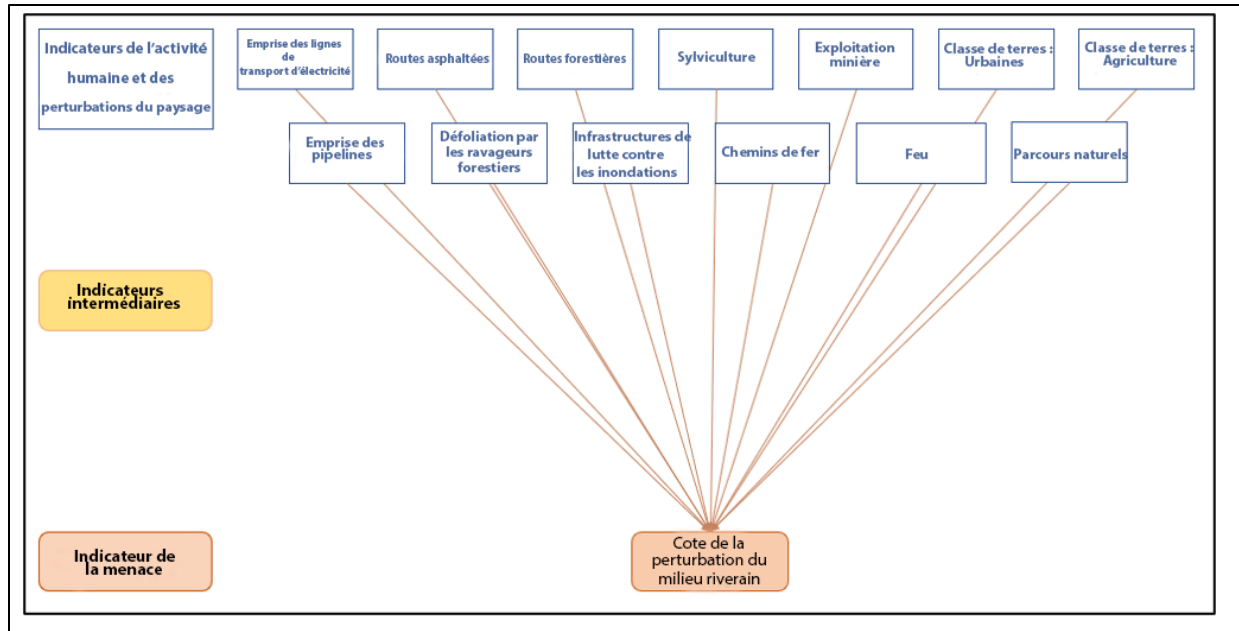


Figure 14. Diagramme des séquences des effets de la menace de la perturbation du milieu riverain.
EMP = Emprise.

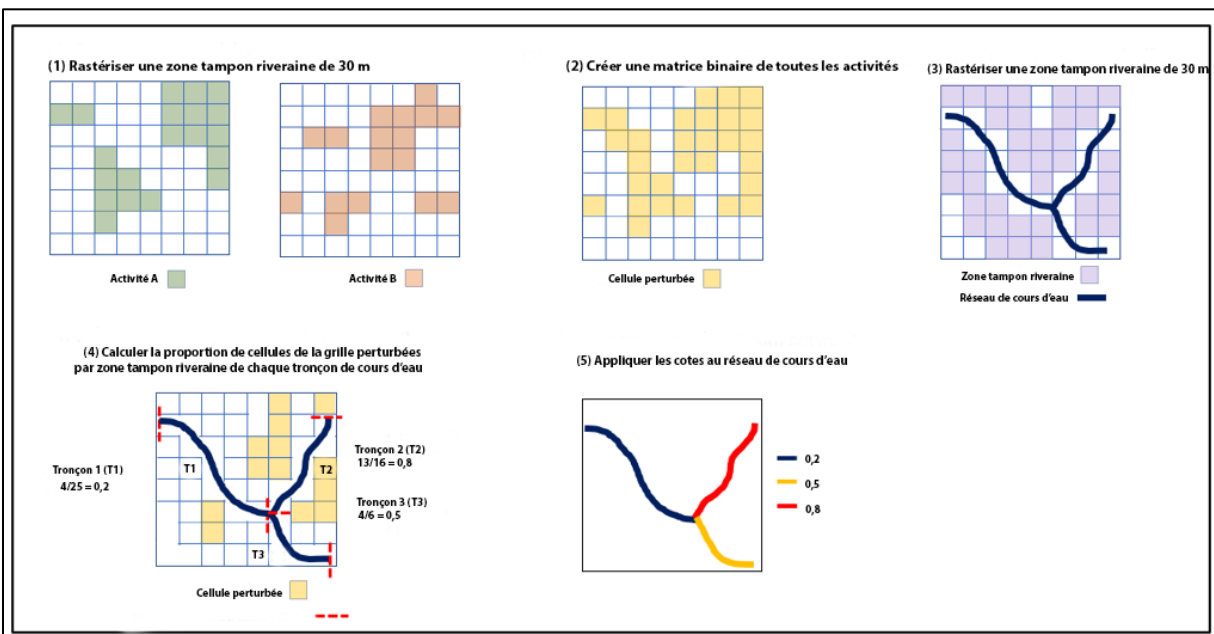


Figure 15. Calcul de la menace de la perturbation du milieu riverain.

2.3.1.8. Éléments nutritifs, pollution et sédimentation : calculs de l'accumulation du débit

Les intrants d'éléments nutritifs, de pollution et de sédimentation dans les cours d'eau résultant d'activités humaines et de perturbations du paysage peuvent nuire grandement au poisson et à son habitat. L'excès d'éléments nutritifs peut causer l'eutrophisation et entraîner la prolifération et la mortalité d'algues qui réduisent l'OD pour les organismes aquatiques. Par exemple, on a estimé que 40 % de l'habitat essentiel du meunier de Salish subissait une hypoxie causée par

les interactions entre le faible débit des cours d'eau, les températures chaudes des cours d'eau et l'eutrophisation (Rosenfeld *et al.* 2021). La pollution de l'eau douce peut nuire à la croissance, à la fonction du système immunitaire, à l'osmorégulation et provoquer une augmentation du stress et de la mortalité chez les poissons (Ross *et al.* 2013). Les salmonidés anadromes sont considérés comme particulièrement vulnérables en raison de leurs diverses expositions aux contaminants, car ils utilisent différents habitats tout au long de leur cycle biologique, ainsi que de leur sensibilité inhérente aux toxines par rapport à d'autres espèces de poissons (Ross *et al.* 2013). La sédimentation excessive résultant des activités humaines et des perturbations du paysage réduit également la survie des salmonidés entre les stades de l'œuf et de l'alevin en suffoquant et en piégeant les œufs pondus dans le gravier des lits de cours d'eau (Jensen *et al.* 2009).

Nous avons calculé les cotes des charges à l'aide des concentrations estimées des éléments nutritifs d'origine humaine, de la pollution et de la sédimentation en nous fondant sur la meilleure information disponible et en suivant une série d'étapes pour tenir compte des principaux mécanismes : les intrants de sources diffuses d'après les classes d'utilisation des terres et les taux de ruissellement de surface, les intrants de sources ponctuelles, la fonction de filtrage riverain, l'accumulation en aval et la dilution en fonction du débit du cours d'eau (voir les détails sur le ruissellement de surface et les données sur le débit du cours d'eau dans la section « Menaces liées aux changements climatiques : Débit du cours d'eau »; figure 16). L'approche appliquée ici représente une estimation de la charge maximale, car elle ne tient pas compte des processus à plus petite échelle qui pourraient réduire la charge dans le cours d'eau (p. ex. dépôt, rétention, absorption). De plus, les relations généralisées appliquées (p. ex. la fonction de filtrage riverain) distinguent probablement mieux les valeurs supérieures et inférieures, tandis que diverses sources d'erreur peuvent créer plus d'incertitude pour les valeurs situées au milieu de la plage.

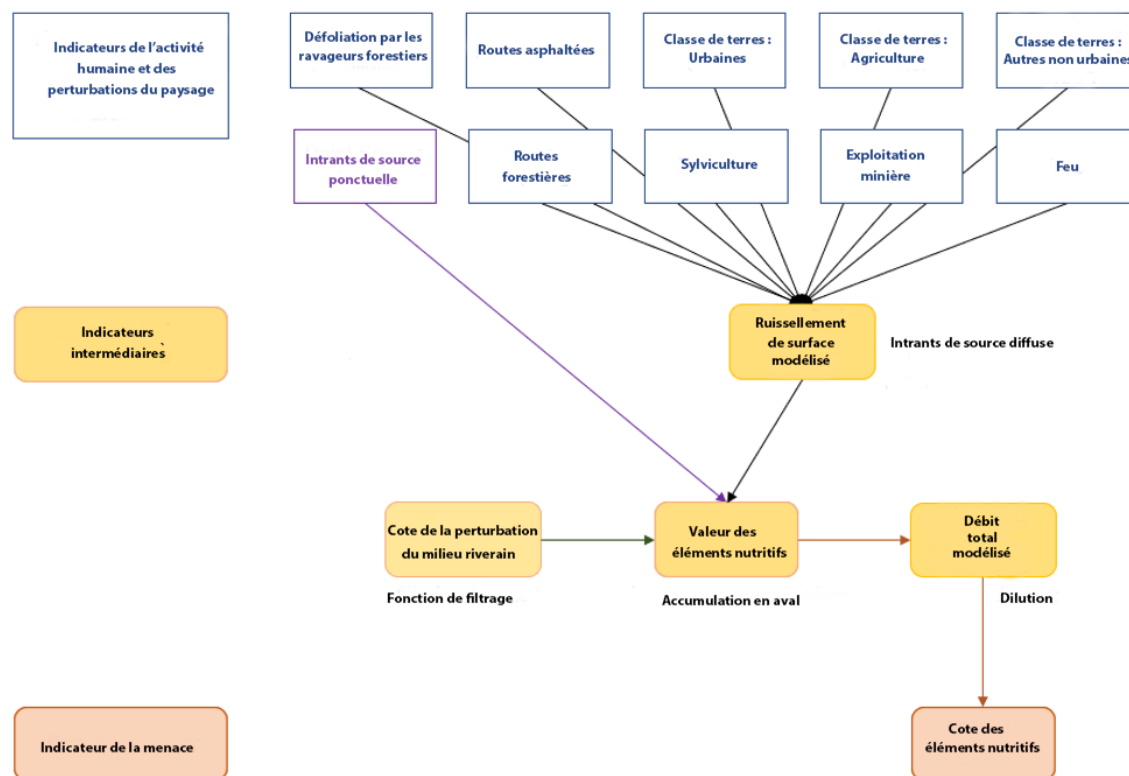


Figure 16a. Diagramme des séquences des effets pour la charge en éléments nutritifs. Les intrants de sources ponctuelles pour les éléments nutritifs contenaient des valeurs sur les activités humaines, y compris les mines, les usines de pâtes et papiers, les propriétaires de BPC, les installations de transformation des fruits de mer, les déchets solides, les déversements, les usines de traitement des eaux usées, les déchets de bois et autres installations commerciales, indiquées dans une base de données compilée (ECCC 2022).

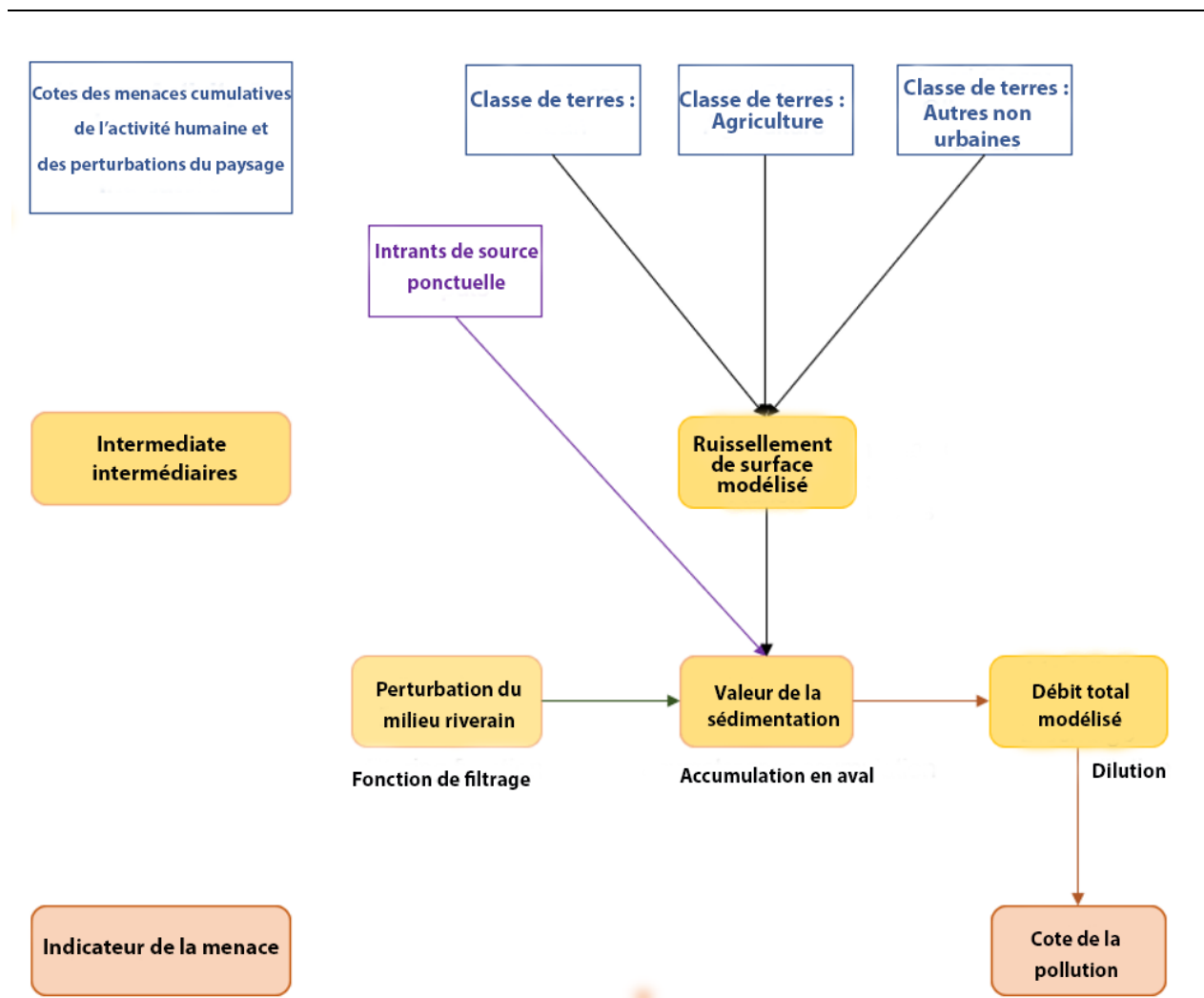


Figure 16b. Diagramme des séquences des effets pour la charge en pollution. Les intrants de sources ponctuelles pour la pollution contenaient des valeurs sur les activités humaines, y compris les mines, les usines de pâtes et papiers, les propriétaires de BPC, les installations de transformation des fruits de mer, les déchets solides, les déversements, les usines de traitement des eaux usées, les déchets de bois et autres installations commerciales, indiquées dans une base de données compilée (ECCC 2022).

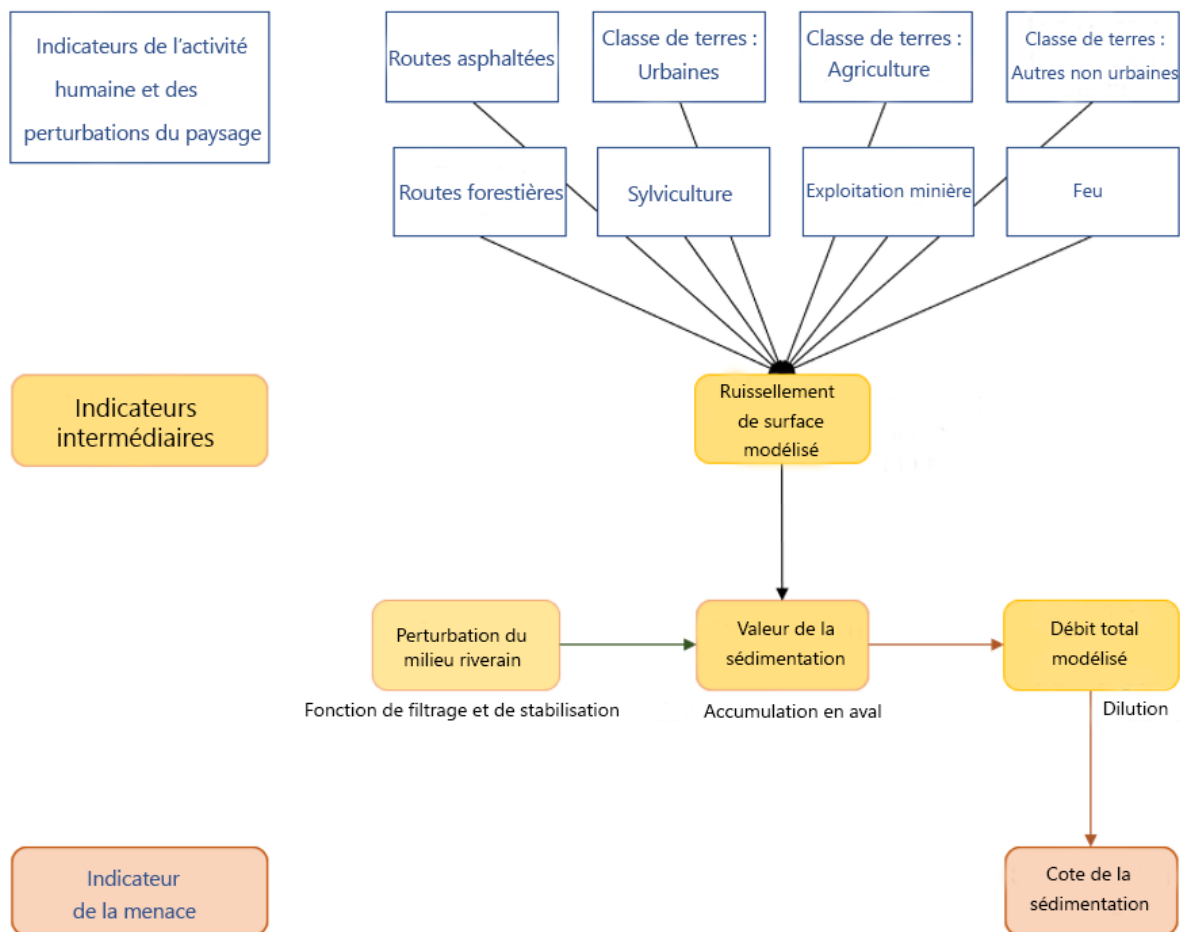


Figure 16c. Diagramme des séquences des effets pour la charge en sédiments.

Nous avons d'abord calculé les intrants de sources diffuses à l'aide des coefficients de concentration appliqués aux classes d'utilisation des terres agricoles, urbaines et autres non urbaines fournis par l'OIPABP à partir de son analyse documentaire; nous avons additionné les coefficients de concentration entre les intrants de contaminants pertinents pour les nutriments et la pollution (ECCC 2022; figure 17, étape 1). Nous avons effectué une recherche documentaire supplémentaire pour ajouter des coefficients de concentration de sources diffuses pour les éléments nutritifs et la sédimentation, ainsi que pour d'autres classes d'activité humaine et de perturbation (tableau 1); nous n'avons pas trouvé d'autre coefficient de source diffuse pour la pollution. Nous avons attribué aux blocs de coupe forestière, aux feux de forêt et à la défoliation par les ravageurs forestiers un coefficient estimatif pour les éléments nutritifs égal au double du coefficient de l'OIPABP pour les « autres terres non urbaines », car chacune de ces perturbations liées à la forêt peut avoir des répercussions semblables et relativement élevées sur le ruissellement des éléments nutritifs dans les cours d'eau (Hélie *et al.* 2005; Donahue 2013; Silins *et al.* 2014). La quantité réelle d'éléments nutritifs exportés dans les cours d'eau à la suite de perturbations forestières dépend de facteurs comme la quantité de végétation restante, la repousse et l'état de l'azote de la forêt (Hélie *et al.* 2005; Silins *et al.* 2014). Par exemple, on a observé une augmentation de 7 à 9 fois du phosphore total (PT) à la suite d'un grave feu de forêt en Alberta (Silins *et al.* 2014), et une augmentation de 1 à 2 fois la quantité d'azote a résulté d'une perte intense causée par les feux dans les montagnes de la Sierra Nevada, aux États-Unis (Johnson *et al.* 1997; Donahue 2013).

Nous avons créé un seul ensemble de données sur la couverture terrestre pour le BFF en utilisant toutes les couches pertinentes de l'activité humaine et de la perturbation du paysage pour la menace des éléments nutritifs; l'ensemble des intrants d'éléments nutritifs comprenait tous les intrants utilisés pour les menaces de la sédimentation et de la pollution. Les types de couverture terrestre qui n'ont pas été inclus en tant qu'intrant pour une menace (p. ex. la foresterie n'était pas un intrant pour la menace de la pollution) ont été traités comme appartenant à la catégorie « autres non urbaines » pour le calcul de cette menace. Les chevauchements spatiaux dans différentes classifications rastérisées des terres dans les cellules de la grille (p. ex. les mines et les routes) ont été résolus au moyen d'une séquence de classement par ordre de priorité fondée sur l'échelle des caractéristiques de la couche de données (p. ex. les routes étaient des caractéristiques à plus petite échelle que l'agriculture et étaient donc prioritaires). Les chevauchements des intrants liés à la forêt, qui comptaient plusieurs années de données, ont été résolus comme suit : foresterie > ravageurs > feu. Nous avons ainsi inclus en priorité les activités humaines plutôt que les perturbations du paysage (p. ex. la foresterie serait incluse même si l'emplacement a également subi une défoliation par les ravageurs ou un feu). Étant donné que les coefficients étaient les mêmes dans toutes les catégories de perturbations forestières (à une exception près : aucun coefficient n'est connu pour la défoliation par les ravageurs dans la sédimentation), cela n'a eu d'incidence que sur notre calcul de la proportion des contributions de chaque perturbation à ces menaces.

Nous avons utilisé la proportion de chaque type de couverture terrestre à l'intérieur d'un bassin hydrographique fondamental pour répartir les taux annuels moyens totaux de ruissellement de surface (d'après les moyennes climatiques modélisées de 1981 à 2010; voir tous les détails des modèles de débit des cours d'eau dans la section « Menaces liées aux changements climatiques : Débit des cours d'eau »), et l'avons ensuite multipliée par le coefficient de concentration correspondant (figure 17, étape 2). Nous avons exclu la superficie de la surface de l'eau (lacs et rivières) du calcul de la proportion parce que la superficie ne contribue pas au ruissellement de sources diffuses. Nous avons ainsi obtenu une estimation initiale de la contribution du ruissellement de surface de source diffuse selon le type de couverture terrestre.

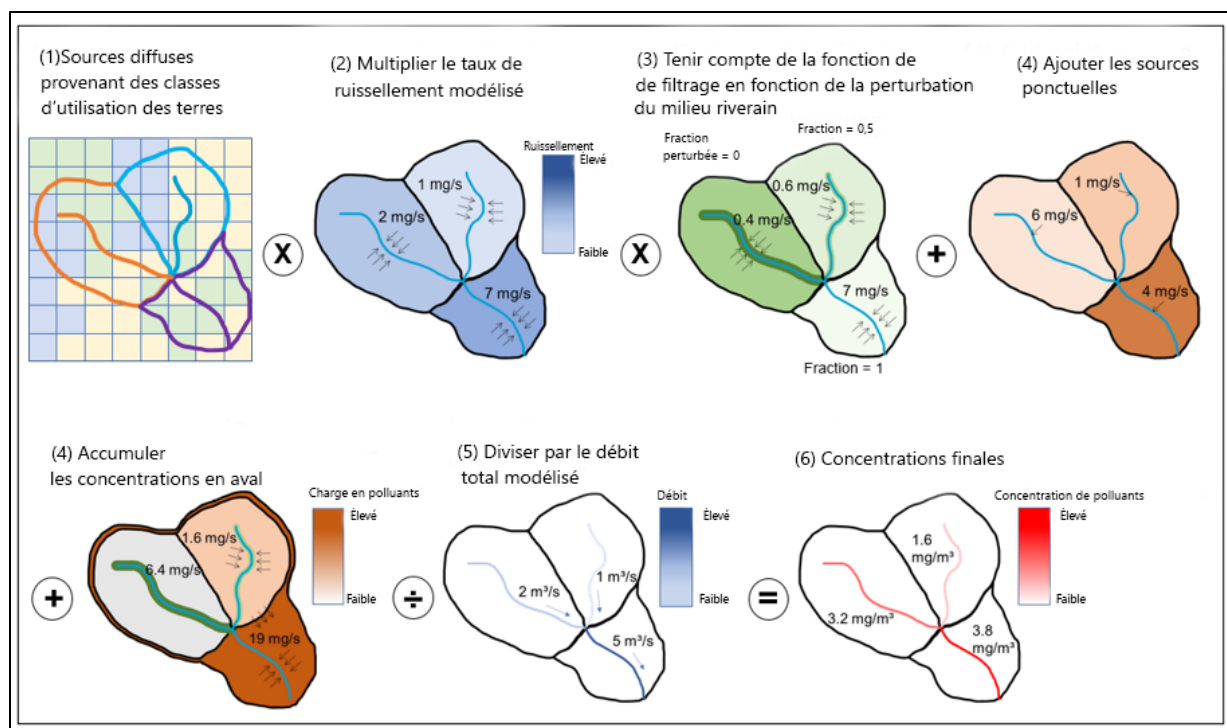


Figure 17. Étapes de l'accumulation du débit utilisées pour estimer les intrants d'éléments nutritifs, de pollution et de sédiments dans les cours d'eau résultant des activités humaines et des perturbations du paysage.

Tableau 1. Coefficients de concentration utilisés pour calculer les contributions des sources diffuses d'éléments nutritifs, de pollution et de sédimentation dans les cours d'eau en Colombie-Britannique.

Source diffuse	Éléments nutritifs	Pollution	Sédimentation	Références
<i>Classe d'utilisation des terres</i>				
Agriculture	35,33	0,2834	86,2	ECCC (2022)
Urbaines	2,054	0,5292	31,2	ECCC (2022)
Autres non urbaines	0,64	0,032	13,6	Donahue (2013), Silins <i>et al.</i> (2014), ECCC (2022)
<i>Activités anthropiques et perturbations du paysage</i>				
Feux de forêt	1,28	S.O.	20,4	Hélie <i>et al.</i> (2005), Donahue (2013), Silins <i>et al.</i> (2014)
Blocs de coupe forestière	1,28	S.O.	20,4	Donahue (2013), Silins <i>et al.</i> (2014)
Exploitation minière	1,33	S.O.	93,94	Donahue (2013), ECCC (2022)

Source diffuse	Éléments nutritifs	Pollution	Sédimentation	Références
Défoliation par les ravageurs forestiers	1,28	S.O.	S.O.	Hélie <i>et al.</i> (2005), Donahue (2013)
Routes	12,425	S.O.	50,65	Donahue (2013)

Nous avons ensuite estimé la capacité des zones tampons riveraines à filtrer les intrants de sources diffuses en utilisant la fraction de la zone riveraine perturbée tirée du calcul de la menace de la perturbation du milieu riverain (figure 17, étape 3). L'efficacité d'élimination est déterminée en grande partie par la largeur de la zone tampon, mais elle est également influencée par la pente topographique et le type de végétation (Quinn *et al.* 2020). Une équation non linéaire de l'efficacité d'élimination fondée sur la largeur de la zone tampon ($E_R = a + b \ln(\text{width})$) publiée précédemment s'est révélée avoir une puissance descriptive (R^2) allant jusqu'à 0,37 pour les sédiments, 0,44 pour l'azote, 0,39 pour le phosphore et 0,61 pour les pesticides (Zhang *et al.* 2010; Quinn *et al.* 2020). Une zone tampon riveraine de 30 m correspond à une efficacité d'élimination moyenne estimée d'environ 95 % pour les sédiments, 80 % pour l'azote, 99 % pour le phosphore et 99 % pour les pesticides (Quinn *et al.* 2020). Nous n'avons pas tenu compte de la pente topographique et du type de végétation, car ces influences sont complexes et il faudrait obtenir des données sur la végétation à petite échelle par des sources comme le LiDAR (détection et télémétrie par ondes lumineuses), mais cet aspect pourrait être intégré dans de futurs modèles à plus petite échelle. Dans cette itération, nous avons seulement tenu compte de la perturbation, le cas échéant, de la zone tampon riveraine par des activités humaines en fonction de la largeur de 30 m de la zone tampon. Nous avons utilisé la fraction de la zone riveraine perturbée dans le bassin hydrographique fondamental et avons considéré qu'une fraction de 0 (c.-à-d. aucune perturbation) avait une capacité de filtrage de 80 % pour une efficacité de filtrage prudente pour une zone tampon riveraine saine de 30 m de large (Quinn *et al.* 2020) et qu'une fraction de 1 (c.-à-d. perturbation complète) n'avait aucune capacité de filtrage. Cette mise à l'échelle de 0 à 80 % a été multipliée par nos concentrations d'intrants, de sorte qu'une zone tampon riveraine non perturbée filtrait 80 % des intrants estimés et qu'une zone tampon complètement perturbée n'avait aucune fonction de filtrage.

Les intrants des sources ponctuelles ont été compilés par l'OIPABP et comprenaient les activités humaines de l'exploitation minière, des usines de pâtes et papiers, des propriétaires de BPC, des installations de transformation des fruits de mer, des déchets solides, des déversements, des usines de traitement des eaux usées, des déchets de bois et d'autres installations commerciales (ECCC 2022). L'outil OIPABP a également évalué les sites contaminés de l'Inventaire des sites contaminés fédéraux, mais les données n'étaient pas suffisantes pour quantifier les rejets (ECCC 2022). Nous avons additionné les concentrations d'éléments nutritifs et de pollution provenant de sources ponctuelles déterminées par l'OIPABP (ECCC 2022) pour chaque bassin hydrographique fondamental (figure 15, étape 4); les intrants d'éléments nutritifs provenant de sources ponctuelles étaient l'ammoniac, les nitrates et les phosphates; la pollution comprenait tous les autres intrants, à l'exception de ceux mentionnés comme « autres toxines » (ECCC 2022). La catégorie des « autres toxines » englobait les intrants de la sédimentation, qu'il n'avait pas été possible de différencier des autres intrants, de sorte que nous n'avons pas inclus les sources ponctuelles de sédimentation. Nous avons exploré la capacité de déterminer la probabilité que les polluants se déplacent en aval plutôt

que de se déposer en tant que sédiments (p. ex. en utilisant la répartition octanol/eau, le $\log K_{OE}$ ou le coefficient de partage du carbone organique, K_{CO} ; Quinn *et al.* 2020). Cette information n'était pas facilement disponible pour de nombreux polluants, mais elle améliorerait l'estimation future de la pollution.

À l'étape suivante, nous avons calculé les charges accumulées en éléments nutritifs, en pollution et en sédimentation pour chaque tronçon de cours d'eau en déterminant et en additionnant les charges de tous les bassins hydrographiques fondamentaux du bassin hydrologique (Weller *et al.* 2023; figure 17, étape 5). Nous avons tenu compte de la dilution des intrants en divisant chaque charge accumulée par le débit annuel moyen total modélisé pour la période historique (Vörösmarty *et al.* 2010) (figure 17, étape 6; voir tous les détails des modèles de débit dans la section « Menaces liées aux changements climatiques : Débit des cours d'eau »). Nous avons ainsi obtenu l'estimation finale de la charge, une cote de 0 indiquant qu'il n'y avait pas de charge estimée, et une cote de 1 indiquant la charge estimée la plus élevée dans l'ensemble du BFF (figure 17, étape 7).

Les concentrations de sources ponctuelles et diffuses utilisées ici étaient les meilleures disponibles au moment de la collecte des données. L'information sur la contribution des sources diffuses est particulièrement connue pour présenter des lacunes, car elle a été tirée d'une documentation relativement limitée et devait inclure des études dans d'autres régions de l'ouest de l'Amérique du Nord (ECCC 2022). Les coefficients de concentration de certains intrants peuvent manquer pour différentes classes de terres en raison de l'absence de données, auquel cas l'intrant total estimé pour ces classes de terres serait sous-représenté. Une autre considération est que les coefficients de concentration pour les sources diffuses dépendent des caractéristiques du ruissellement de surface provenant des études correspondantes et peuvent ne pas correspondre aux limites du ruissellement modélisé appliquées ici; cette non-concordance pourrait résulter d'une variation saisonnière ou annuelle. Il n'est pas directement possible de remédier à la disparité saisonnière sans élaborer une série chronologique saisonnière des coefficients. La non-concordance annuelle peut être quelque peu corrigée en appariant le ruissellement modélisé sur la même période que celle qui délimite les dates de l'étude, bien que cela puisse être limité par les modèles de débit disponibles. L'outil OIPABP a élaboré son propre modèle de débit pour l'apparier aux coefficients de source diffuse; cependant, nous avons utilisé différents modèles disponibles afin de pouvoir apparier les estimations du ruissellement et du débit (voir les détails dans la section « Menaces liées aux changements climatiques : Débit des cours d'eau »). Ces données sont continuellement améliorées et il est recommandé d'utiliser des données d'entrée et des modèles de débit actualisés à mesure qu'ils deviennent disponibles pour les itérations futures de ces cotes des menaces. Enfin, les polluants ont des degrés d'effet différents sur les poissons, et les concentrations auxquelles ces effets commencent à être ressentis sont également différentes. Par exemple, l'outil OIPABP a déterminé que les contaminants prioritaires pour le saumon chinook devaient être concentrés sur ceux qui sont les plus susceptibles de causer des dommages (ECCC 2022). Cette délimitation est un facteur important pour les prochaines phases de l'application des cotes de la charge en pollution afin d'estimer l'effet des polluants sur les poissons.

2.3.2. Menaces liées aux changements climatiques

Les changements climatiques entraînent des changements dans les conditions moyennes à long terme et dans la fréquence et l'ampleur des phénomènes extrêmes qui ont des effets multiples et interdépendants sur le poisson et son habitat. Les principales variables climatiques préoccupantes pour le poisson et son habitat sont la température et le débit des cours d'eau. Les variations de la température de l'air et des précipitations ont une incidence directe sur la

température et le débit des cours d'eau et influencent d'autres forces motrices qui influent davantage sur ces deux variables, comme les feux de forêt (Beyene *et al.* 2022), le recul des glaciers (Pitman *et al.* 2020; Weller *et al.* 2023) et la réduction du manteau neigeux (Mote *et al.* 2003). Les inondations et les sécheresses hydrologiques sont des phénomènes extrêmes liés au débit qui se sont intensifiés ces dernières années dans le BFF et devraient s'aggraver (Brice *et al.* 2021). On prévoit des sécheresses hydrologiques plus précoces et plus longues avec une réduction des précipitations de la saison froide stockées sous forme de neige accumulée (Islam *et al.* 2017). Les inondations surviennent lorsque des débits élevés au printemps se combinent à des épisodes de précipitations extrêmes (Brice *et al.* 2021). La réduction des précipitations sous forme de neige devrait se traduire par des inondations plus rapides, plus fréquentes et plus précoces, suivies de sécheresses estivales plus graves qui pourraient se produire la même année (Brice *et al.* 2021).

Nous avons compilé les meilleurs modèles disponibles et spatialement complets des menaces liées aux changements climatiques pour le risque d'inondation, les débits faibles et élevés et les températures chaudes (c.-à-d. estivales) des cours d'eau. Les projections modélisées représentaient les moyennes climatiques (moyennes sur des périodes de 20 à 40 ans) et nous présentons les résultats jusqu'en 2060 comme une période pertinente pour la gestion (Dey *et al.* 2023). Les changements prévus dans l'habitat du poisson en Colombie-Britannique en fonction des températures des cours d'eau et des précipitations montrent également que la majeure partie des changements au cours du prochain siècle se produiront d'ici 2060, selon le profil représentatif d'évolution de concentration (RCP) 4.5 (Iacarella et Weller 2023; Weller *et al.* 2023). Nous avons fourni des cotes distinctes pour des scénarios climatiques futurs (un scénario « modéré » et un « pire scénario ») à l'aide des scénarios et des modèles climatiques mondiaux (MCG) des phases 5 et 6 du Projet de comparaison de modèles couplés (CMIP5 et CMIP6, respectivement). Le scénario « modéré » utilisait le profil RCP 4.5 (du CMIP5) ou le profil socioéconomique partagé (PSP) 2–4.5 (du CMIP6). Le « pire scénario » utilisait le profil RCP 8.5 ou PSP5–8.5. Dans le reste du document, le scénario « modéré » et le « pire scénario » sont désignés par RCP 4.5 et RCP 8.5 dans un souci de simplicité. Nous avons calculé les cotes des menaces pour chaque scénario climatique à l'aide d'une moyenne d'ensemble des projections climatiques de plusieurs MCG; tous les MCG inclus dans l'ensemble pour chaque menace variaient en fonction de la disponibilité des données (annexe E). D'autres évaluations des effets des changements climatiques (p. ex. des analyses de la vulnérabilité aux changements climatiques) peuvent également caractériser la variabilité ou les écarts prévus par rapport à la moyenne lorsqu'une résolution temporelle plus élevée est modélisée, mais nous avons sélectionné une résolution spatiale élevée plutôt qu'une résolution temporelle pour notre concentration sur les tronçons de cours d'eau. Les modèles compilés comprenaient plusieurs éléments des effets des changements climatiques (p. ex. les températures des cours d'eau influencées par la température de l'air, les précipitations et la couverture des glaciers), mais n'englobent pas actuellement tous les effets liés au climat (p. ex. les feux de forêt) qui interagissent ou incluent explicitement les menaces humaines qui interagissent (p. ex. extraction d'eau, perturbation du milieu riverain; Schnorbus 2020; Mohanty et Simonovic 2021; Weller *et al.* 2023).

Les cotes des menaces liées aux changements climatiques ont été transformées et mises à l'échelle selon les mêmes méthodes que celles des menaces liées à l'activité humaine.

2.3.2.1. Risque d'inondation

Le risque d'inondation a été estimé comme le niveau d'eau en surface modélisé (m) pour les cours d'eau situés dans la zone d'inondation terrestre fournie par Floodmapviewer (Mohanty et Simonovic 2021; Simonovic *et al.* 2023). Mohanty et Simonovic (2021) ont appliqué au Canada un modèle d'inondation à l'échelle macro fondé sur le bassin hydrologique et ramené les cartes

des plaines inondables ainsi obtenues à une résolution de 1 km². Le MPO a également utilisé Floodmapviewer dans ses rapports sur le poisson et l'habitat du poisson pour la région de l'Ontario et des Prairies en utilisant des périodes de retour de 100 et de 200 ans (Dey *et al.* 2023). Nous nous sommes concentrés sur la période de retour de 100 ans dans l'ensemble des MCG du CMIP6 pour les profils RCP 4.5 et RCP 8.5 (annexe E). Pour cette menace, nous avons calculé la variation du niveau d'eau en surface entre les conditions actuelles (de 1980 à 2019) et la période des projections, de 2022 à 2060. Nous avons cartographié les valeurs brutes des changements et utilisé les valeurs absolues des changements pour établir la cote des menaces cumulatives, car des augmentations ou des diminutions importantes du niveau des crues peuvent avoir des répercussions négatives sur l'habitat du poisson. Une cote de 0 indiquait qu'aucun changement n'était projeté pour les niveaux de crue, et une cote de 1 indiquait le plus grand changement projeté (augmentation ou diminution du niveau de crue) dans l'ensemble du BFF. Il est important de souligner que la modélisation des risques d'inondation comporte des niveaux élevés d'incertitude et qu'il serait bon de tenir compte d'autres paramètres (p. ex. autres périodes de retour, décalages de la période de retour pour une ampleur de crue donnée) à condition de poursuivre l'élaboration de tels efforts de modélisation.

2.3.2.2. Débit des cours d'eau

Le débit des cours d'eau est modélisé à l'aide de modèles hydrologiques mécanistes. Les résultats du modèle de débit des cours d'eau que nous avons utilisés proviennent du Pacific Climate Impacts Consortium (PCIC) à l'aide d'un modèle de capacité d'infiltration variable (CIV) qui intègre les composantes du ruissellement, de l'évapotranspiration et des changements dans le stockage de l'eau provenant de la neige, des glaciers, du sol, des eaux souterraines et des lacs; la composante des glaciers a été ajoutée par le PCIC et intègre l'accumulation, la fonte, le ruissellement et les variations de la superficie du glacier (CIV-GL; Schnorbus 2020). Le modèle CIV-GL a été produit pour les bassins fluviaux jaugés de la Colombie-Britannique qui se déversent dans les eaux de marée et a une résolution quadrillée de 1/16° (environ 30 km²). Les composantes modélisées du ruissellement total et du ruissellement (p. ex. ruissellement de surface, débit de base, émissaire du glacier) sont disponibles sous forme de séries chronologiques quotidiennes projetées de 1945 à 2100 pour de multiples scénarios de changements climatiques.

Étant donné que nous nous intéressons à des résolutions de tronçons de cours d'eau, nous avons utilisé les extraits du modèle CIV-GL pour le débit de base et le ruissellement de surface réduits à la résolution des bassins hydrographiques fondamentaux pour le BFF. Nous avons utilisé les taux de ruissellement de surface à échelle réduite pour les bassins hydrographiques fondamentaux pour estimer les charges de source diffuse pour les menaces accumulées par le débit. Nous avons additionné le débit de base et le ruissellement de surface à échelle réduite et les avons accumulés en aval pour prévoir le débit (débit du cours d'eau). Le processus de réduction d'échelle a nécessité de réduire la résolution temporelle à des échelles de temps mensuelles afin de limiter les inexactitudes. Des travaux en cours par le PCIC, qui doivent être achevés en 2026, fourniront des extraits sur le débit à la résolution des bassins hydrographiques fondamentaux pour la même étendue que le modèle CIV-GL, ce qui permettra une analyse plus poussée avec des résolutions temporelles plus précises.

Le processus de réduction d'échelle a été élaboré et mené pour le MPO par Foundry Spatial, une entreprise de développement de logiciels axée sur la recherche sur la durabilité de l'eau et la recherche hydrologique. Nous détaillons la méthode de réduction d'échelle pour le débit des cours d'eau ici pour plus de clarté (le ruissellement de surface a été réduit selon la même méthode, mais nous n'avons pas tenu compte du bassin hydrologique en amont, ni de la régulation du débit).

Tout d'abord, nous avons additionné les variables du débit de base quotidien et du ruissellement de surface de la grille du CIV-GL pour créer une grille du ruissellement quotidien en mm. La grille du ruissellement était un sous-ensemble de l'étendue du BFF et résumée comme un débit mensuel total, saisonnier et annuel minimal, maximal et moyen calculé pour la période de 1981 à 2010. Nous avons ensuite attribué ces valeurs sommaires du ruissellement quadrillé aux unités du bassin hydrographique fondamental en fonction du centroïde du bassin hydrographique. Dans un deuxième temps, nous avons attribué une climatologie quadrillée des précipitations (en mm) pour la période historique (de 1981 à 2010) tirée de [ClimateNA](#) (grille de 400 m²) aux unités du bassin hydrographique fondamental.

La méthode de réduction d'échelle visait à générer le ruissellement minimal, maximal et moyen pour chaque unité du bassin hydrographique fondamental (figure 18). Cette méthode suppose que la variabilité spatiale des précipitations est proportionnelle à celle des valeurs du ruissellement à échelle réduite du PCIC. L'équation pour les valeurs matricielles à échelle réduite (Y_i) est la suivante :

$$Y_i = r + (X_i - m_1)$$

où m_1 est la précipitation moyenne (en mm) dans une cellule de grille du modèle CIV-GL, r est la valeur du ruissellement (en mm) de la cellule de grille du modèle CIV-GL et X_i est la précipitation moyenne (en mm) de l'unité du bassin hydrographique. En cas de valeurs négatives transformées (de 1 à 14 % des bassins hydrographiques selon le mois), nous avons utilisé la valeur transformée positive la plus faible dans la cellule de grille du modèle CIV-GL. Pour chaque unité du bassin hydrographique, nous avons converti le ruissellement en un débit (m³/s) à l'aide de la superficie du bassin hydrographique et de l'unité de temps (mois, saison ou année). Nous avons ensuite calculé le débit du cours d'eau en accumulant tous les débits de ruissellement des unités du bassin hydrographique en amont dans le bassin hydrologique (figure 18).

Nous avons ajusté les estimations mensuelles du débit des cours d'eau pour les bassins hydrographiques fondamentaux associés à six barrages où la régulation du débit a fait l'objet d'un suivi par les stations hydrométriques avoisinantes avec des mesures postérieures à 1980 :

1. le barrage Skins Lake n° 3 (barrage de col) à la sortie du réservoir Nechako,
2. le barrage principal Seton à la sortie du lac Seton,
3. le barrage Walden Power à Cayoosh Creek,
4. le barrage Alouette à l'aide d'une jauge sur la rivière Alouette à 12 km en aval,
5. le barrage de Coquitlam à l'aide d'une jauge sur la rivière Coquitlam à 12 km en aval et
6. le barrage La Joie à la sortie du lac Downton.

Un facteur de correction a été appliqué aux estimations modélisées du débit des cours d'eau dans les bassins hydrographiques fondamentaux associés à ces barrages afin d'ajuster ces estimations pour qu'elles correspondent au débit régulé observé. Ces corrections de la régulation ont été appliquées à la série chronologique complète des projections climatiques. Les unités du bassin hydrographique fondamental de la rivière Nechako entre le barrage Kenney et le confluent de la rivière Cheslatta et de la rivière Nechako ont été retirées en raison de modifications techniques au bassin du réservoir Nechako dans la rivière Nechako; ces unités du bassin hydrographique ne sont plus exactes dans le FWA et ont été retirées de l'analyse complète ($n = 26$).

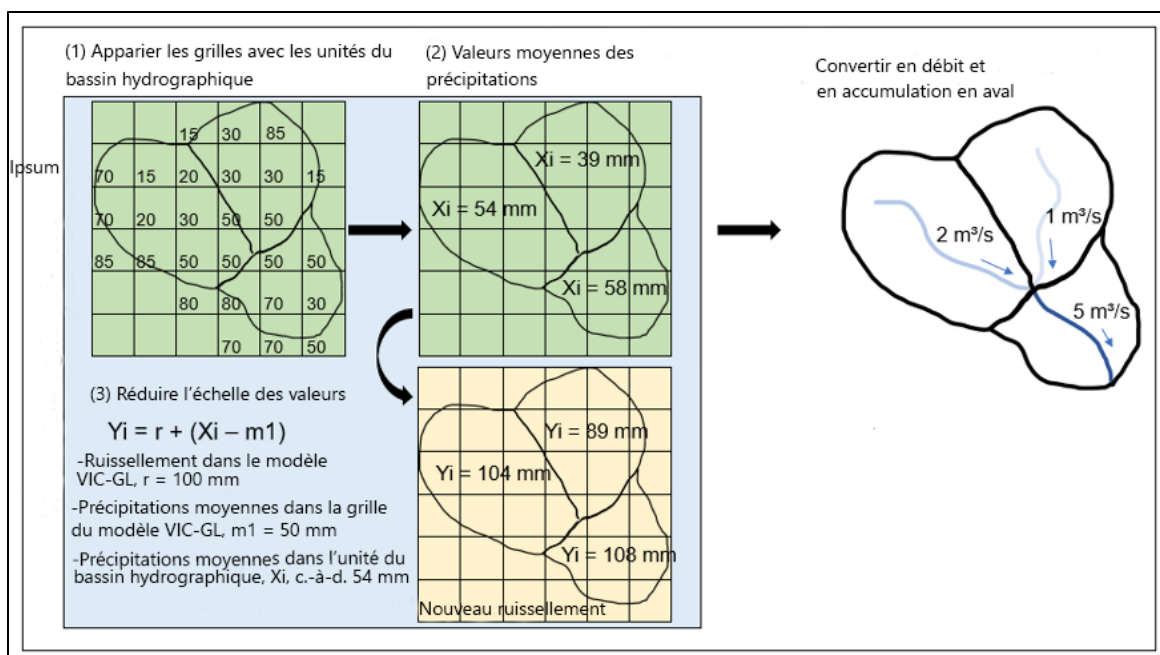


Figure 18. Méthode pour réduire l'échelle du ruissellement des cours d'eau et attribuer les valeurs du débit aux bassins hydrographiques fondamentaux (Foundry Spatial). Les valeurs matricielles à échelle réduite (Y_i) sont calculées à partir de la valeur du ruissellement (en mm) de la cellule de grille du modèle CIV-GL (r), de la précipitation moyenne (en mm) dans une cellule de grille du modèle CIV-GL (m_1) et de la précipitation moyenne (en mm) de l'unité du bassin hydrographique (X_i).

Le processus de réduction d'échelle a été appliqué aux couches disponibles pour les projections climatiques et produit sous forme de résumés des débits mensuels, saisonniers et annuels totaux minimaux, maximaux et moyens sur des périodes climatiques moyennes de 20 ans (de 2020 à 2040, de 2040 à 2060, de 2060 à 2080, de 2080 à 2100) à l'aide des profils RCP 4.5 et 8.5 dans six MCG de l'époque du CMIP5 (annexe E).

Foundry Spatial a comparé les résultats à échelle réduite aux extrants originaux du modèle CIV-GL du PCIC, ainsi qu'aux débits observés à 86 postes de marégraphie dans l'ensemble du BFF (annexe F). Les paramètres de rendement comparant les résultats à échelle réduite aux couches du modèle CIV-GL aux postes de marégraphie entre les mois ont indiqué un degré élevé de congruence (paramètres de rendement moyens sur plusieurs mois pour les extrants à échelle réduite par rapport au modèle CIV-GL : $R^2 = 0,99$, pourcentage d'erreur absolue moyenne = 11,26 % et efficacité de Nash-Sutcliffe = 0,98). Les paramètres de rendement des résultats du modèle à échelle réduite comparés aux postes de marégraphie ont révélé un rendement global élevé, avec certains cas de rendement inférieur, en particulier pour les débits minimaux d'août et de septembre au cours de la période historique (de 1981 à 2010; annexe F, tableau F1, figure F1).

Pour l'estimation actuelle des menaces de débit faible et élevé des cours d'eau, nous avons utilisé une variation du pourcentage du débit annuel moyen (%DAM) puisqu'il s'agit du paramètre standard utilisé pour déterminer les débits préoccupants pour l'habitat du poisson et l'allocation de prélèvement d'eau (Tennant 1976; Ptolemy et Lewis 2002). La valeur %DAM est généralement calculée comme la proportion du débit pour une journée par rapport au débit quotidien moyen pour une année. Compte tenu de la résolution temporelle à échelle réduite, nous avons utilisé la moyenne des valeurs du débit mensuel total moyen au cours de l'année (« DAM-mensuel ») pour la période historique et calculé %DAM-mensuel pour les débits

mensuels minimum et maximum pour chaque période subséquente par rapport à la période historique. Nous avons axé notre cote de la menace cumulative pour le débit faible des cours d'eau en utilisant le débit mensuel (%DAM) minimal d'août et pour le débit de cours d'eau élevé en utilisant le débit mensuel (%DAM) maximal de mai d'après l'inspection visuelle de la série chronologique de la moyenne mensuelle du %DAM moyen dans l'ensemble du BFF (annexe F, figure F2); des cartes des mois d'intersaison ont été présentées aux fins de comparaison. Une cote de la menace de débit faible des cours d'eau de 0 indiquait les débits mensuels minimaux prévus les plus élevés (%DAM) en août, et une cote de 1 indiquait les débits projetés les plus faibles; à l'inverse, une cote de la menace de débit élevé de 0 indiquait les débits mensuels maximaux les plus faibles prévus en mai (%DAM), et une cote de 1 indiquait les débits projetés les plus élevés.

Le cadre Environmental Flow Needs Risk Assessment Framework mené par le gouvernement provincial de la Colombie-Britannique utilise également des moyennes mensuelles pour calculer la sensibilité du débit des cours d'eau (ministère des Forêts, des Terres, de l'Exploitation des ressources naturelles et du Développement rural [FLNRORD] 2022). Plus précisément, il calcule la sensibilité en fonction du débit mensuel moyen à long terme en tant que pourcentage du débit annuel moyen (DAM) à long terme. On peut ainsi déterminer la sensibilité à différents moments de l'année; le DAM à long terme à lui seul n'indique pas la sensibilité qui peut se produire uniquement durant certaines saisons (FLNRORD 2022). Cependant, les valeurs mensuelles moyennes cachent également une variation potentiellement importante des débits quotidiens qui peut avoir une incidence sur le poisson et son habitat. Les futures itérations des cotes de la menace des débits peuvent tenir compte des paramètres de sensibilité des débits, et le %DAM fondé sur les valeurs quotidiennes ferait progresser les paramètres actuels une fois que les données seront disponibles. Il est également important de prendre en compte, pour l'élaboration future des prévisions des réponses aux agents de stress, le fait qu'il peut y avoir des effets d'interaction entre le débit et la destruction de l'habitat dans les cours d'eau, comme la canalisation, qui modifieront l'impact des différents niveaux de débit sur le poisson et son habitat.

Le débit des cours d'eau est également influencé par les pratiques d'utilisation des terres et, en particulier, par les perturbations forestières (voir les détails dans la section « Estimation de la menace : Activité anthropique et perturbations du paysage : Modification du débit »). Ces perturbations peuvent avoir des effets importants sur les débits de pointe et faibles saisonniers (Goeking et Tarboton 2020). Les changements climatiques devraient généralement accroître la fréquence et l'intensité des feux de forêt au Canada, comme on l'a déjà vu en Colombie-Britannique (Coogan *et al.* 2019), et élargir l'étendue des éclosions de certains ravageurs forestiers (Pureswaran *et al.* 2018). L'effet de ces perturbations sur le débit des cours d'eau dépend de la végétation restante et de la repousse au fil du temps (Coble *et al.* 2020; Goeking et Tarboton 2020). Ces interactions sont très complexes à prévoir, mais, en général, les changements climatiques modifient le débit des cours d'eau sous l'effet de divers mécanismes, notamment directement par les décalages climatiques et indirectement par les perturbations des forêts. Les pratiques d'exploitation forestière exacerbent davantage les changements du débit des cours d'eau (Coble *et al.* 2020; Goeking et Tarboton 2020). L'intersection spatiale des zones de blocs de coupe avec le débit projeté du cours d'eau peut être intéressante pour mettre en évidence les endroits où des niveaux de débit potentiellement préoccupants chevauchent l'exploitation forestière actuelle.

2.3.2.3. Température des cours d'eau

Les modèles de température des cours d'eau sont élaborés à l'aide de modèles hydrologiques ou de modèles statistiques empiriques. Les modèles hydrologiques caractérisent les mécanismes physiques du transfert de chaleur et de l'hydrologie. Ces modèles peuvent être

meilleurs pour projeter des températures en dehors des plages observées actuelles en raison de leur base mécaniste, mais ils sont très exigeants en données et les calculs sont difficiles (Hague et Patterson 2014). Les initiatives actuelles de modélisation hydrologique en Colombie-Britannique fournissent des prévisions de la température à des résolutions de quadrillage de $1/4^\circ$ (environ 480 km²; Islam *et al.* 2017) et de $1/16^\circ$ (Wanders *et al.* 2019; Schnorbus 2020) et à la résolution d'un bassin hydrographique fondamental à l'aide des modèles du cadre hydrologique Raven (Craig *et al.* 2020), bien que cette dernière soit intensive sur le plan informatique et qu'elle ne soit pas encore entièrement développée pour la C.-B. pour le moment (M. Schnorbus, PCIC, comm. pers.). À l'inverse, les modèles statistiques ajustent les relations entre les covariables environnementales et les données sur la température de l'eau in situ. Ces modèles peuvent être définis à des échelles de bassin hydrologique pour une application directe aux bassins hydrographiques fondamentaux et aux tronçons de cours d'eau, et ils sont réalisables à de grandes échelles spatiales à condition que la couverture des données in situ soit adéquate (Isaak *et al.* 2017; Weller *et al.* 2023). Les températures de l'eau sont le plus souvent recueillies en été en Colombie-Britannique, ce qui rend les modèles statistiques plus difficiles à élaborer pour les températures hivernales à ce jour.

Les températures chaudes des cours d'eau ont été représentées à l'aide de modèles statistiques de la température moyenne des cours d'eau en août, actuellement les couches de température des cours d'eau les plus étendues géographiquement et à haute résolution spatiale pour la C.-B. (Weller *et al.* 2023). La température moyenne du cours d'eau en août a été choisie comme le paramètre thermique modélisé pour la Colombie-Britannique afin de correspondre à la modélisation de la température des cours d'eau à grande échelle effectuée dans le nord-ouest du Pacifique (Isaak *et al.* 2016, 2017). La température moyenne des cours d'eau en août est corrélée avec de nombreux paramètres thermiques pour les cours d'eau, en particulier la variabilité thermique et les ampleurs pendant les autres saisons (Isaak *et al.* 2018, 2020). Il s'agit donc d'un paramètre utile pour tenir compte du stress thermique dû aux températures chaudes, ainsi que pour distinguer les cours d'eau ayant des régimes thermiques différents (Isaak *et al.* 2020; Isaak et Young 2023). Le modèle a été élaboré pour les tronçons de cours d'eau en C.-B. dont les bassins hydrologiques ont une superficie d'au moins 1 km², d'après les données in situ disponibles (généralement les cours d'eau de 3^e ordre ou plus; Weller *et al.* 2023). Le modèle a été ajusté aux données sur la température in situ de 562 stations, avec 1 544 stations-années au cours d'une période historique allant de 1981 à 2020. Les variables au niveau du bassin hydrologique étaient la superficie, l'altitude moyenne, la latitude, la couverture fractionnelle des lacs, la couverture fractionnelle des glaciers, la température moyenne de l'air en août pour la période historique, l'anomalie de la température moyenne de l'air en août (différence entre l'année des données et la moyenne de la période historique), les précipitations annuelles moyennes pour la période historique et l'anomalie des précipitations annuelles moyennes (rapport des précipitations d'une année donnée à la moyenne de la période historique). Le modèle n'incluait pas l'utilisation des terres ou la couverture riveraine comme covariables; toutefois, il tient implicitement compte des effets de l'activité humaine ou des perturbations du paysage sur les températures de l'eau au moment de la collecte de données in situ, alors que les modèles hydrologiques doivent inclure explicitement ce mécanisme pour prévoir les températures en fonction des paysages modifiés. Le rendement du modèle correspondait à celui d'autres modèles statistiques à l'échelle régionale publiés ($R^2 = 0.79$, erreur moyenne quadratique = 1,53 °C, erreur absolue moyenne = 1,18 °C; Weller *et al.* 2023). Les températures moyennes des cours d'eau en août ont été projetées pour les mêmes périodes de 20 ans que le débit des cours d'eau et comprenaient les scénarios RCP 4.5 et 8.5 pour 6 MCG de l'époque du CMIP5 (annexe E; Weller *et al.* 2023). Nous avons axé cette cote de menace sur les valeurs absolues plutôt que sur le degré de changement, car c'est probablement la plus importante pour les poissons, en particulier pour les salmonidés

anadromes adaptés aux eaux froides. Par exemple, les tronçons de cours d'eau à haute altitude devraient connaître les plus fortes hausses des températures dans les cours d'eau, mais ces températures sont encore basses par rapport aux cours d'eau à basse altitude où le saumon du Pacifique prédomine (Weller *et al.* 2023). Les cotes de la menace de la température des cours d'eau de 0 à 1 indiquaient une hausse des températures projetées.

2.4. COTE DE MENACE CUMULATIVE

Beaucoup d'évaluations actuelles des effets cumulatifs liés à l'eau douce en C.-B. appliquent des seuils ou des catégories de risque classifiées aux cotes de l'activité humaine ou de la menace, telles qu'elles ont été établies ci-dessus, suivis d'un cumul ou d'une série de règles de synthèse pour parvenir à une cote finale (MPO 2022). Les seuils et la classification sont idéalement tirés des fonctions de réponse à l'agent de stress mesurées sur le terrain ou en laboratoire ou, accessoirement, sont élaborés à l'aide d'une opinion d'experts. Dans la pratique, les décisions concernant les seuils et la classification ont varié considérablement d'un outil à l'autre et comprennent la classification fondée sur la structure des données (p. ex. centiles), la documentation ou l'opinion d'experts (MPO 2022). Pour l'instant, nous n'avons pas appliqué les relations agent de stress-réponse, les seuils ou les niveaux de risque prévus aux cotes établies des menaces; ces éléments seront élaborés au cours de la prochaine étape de la recherche.

Des menaces multiples dans un système peuvent avoir des effets additifs, synergiques ou antagonistes. Les méta-analyses des interactions des agents de stress et des effets cumulatifs ont révélé que dans l'ensemble, les interactions antagonistes sont plus fréquentes, mais que les méta-analyses propres à une paire de combinaisons d'agents de stress couramment étudiées (p. ex. les éléments nutritifs et la température) ont plus souvent fait apparaître des effets additifs (Crain *et al.* 2008). La plupart des évaluations des effets cumulatifs utilisent des cotes additives en partie parce que la compréhension des effets interactifs est limitée (Schäfer et Piggott 2018), et l'intégration de ces effets peut rendre les modèles moins traçables pour la gestion (MacPherson *et al.* 2024). Par exemple, le « modèle Joe », élaboré pour estimer les effets cumulatifs sur les populations de truites de l'Alberta, utilise une approche additive effectuée en multipliant les valeurs proportionnelles agent de stress-réponse (MacPherson *et al.* 2024). On a aussi constaté que le risque cumulatif de mortalité accidentelle du saumon liée à la pêche est le mieux représenté en traitant les valeurs du risque comme additives (c.-à-d. des réponses multiplicatives proportionnelles) plutôt que comme antagonistes ou synergiques (Patterson *et al.* 2017). Dans une méta-analyse mettant à l'essai les prédictions de mortalité à l'aide de cinq modèles nuls pour les effets cumulatifs, les modèles d'addition simple, de dominance, de multiplication et de concentration ont produit des prévisions sous-estimées en moyenne de 8,0 %, 12,9 %, 9,9 % et 6,9 %, respectivement, et l'addition des agents de stress a donné des prévisions surestimées de 5,7 % (Dey et Koops 2021). Nous avons utilisé l'approche de l'addition simple, considérée généralement comme une réponse biologique prévue raisonnable, qui est couramment utilisée et facile à comprendre, et parce que les relations agent de stress-réponse n'ont pas encore été appliquées aux menaces présentées ici pour mieux traiter ce point (Schäfer et Piggott 2018). Nous désignons la cote finale comme une cote de menaces cumulatives, plutôt qu'une cote d'effets cumulatifs à la lumière de cette étape d'évaluation axée sur l'exposition à la menace, et nous n'avons pas encore évalué le risque ou l'effet de cette exposition sur les poissons.

Les cotes de menaces cumulatives ont été élaborées séparément pour les menaces de l'activité humaine et les menaces liées aux changements climatiques. La cote de menaces cumulatives fondée sur l'activité humaine a été appliquée aux tronçons de cours d'eau dans le BFF pour lesquels nous avons pu calculer toutes les menaces connexes. Les cotes de menaces cumulatives résumées pour les groupes de bassins hydrographiques du FWA (n = 68 dans le

BFF) comprenaient toutes les menaces, tandis que les sommaires des menaces cumulatives axés sur les UC du saumon englobaient la fragmentation pour les espèces anadromes, mais non la fragmentation pour les espèces résidentes, et vice versa pour les sommaires axés sur l'habitat des espèces en péril. Les cotes de menaces cumulatives fondées sur les changements climatiques ont été appliquées à tous les cours d'eau dans les bassins hydrologiques d'une superficie d'au moins 1 km² en fonction de la résolution de la modélisation de la température des cours d'eau (Weller *et al.* 2023). Pour les résultats sommaires et l'étude de cas de l'UHE de Thompson-Nicola, nous avons utilisé la cote de menaces cumulatives fondée sur l'activité humaine, calculée selon une approche standard consistant à additionner les cotes transformées et mises à l'échelle. Cependant, nous présentons également une approche comparative pour le BFF, qui classe les estimations des cotes brutes, met à l'échelle les valeurs classées de 0 à 1, puis additionne les valeurs classées. Cette approche crée plus d'équivalence dans les contributions des menaces individuelles à la cote cumulative, car elle élimine une partie de la différence dans les distributions des cotes (sauf qu'elle conserve encore les valeurs de 0 sous forme de 0), bien qu'elle gonfle les différences entre les niveaux des cotes (p. ex. les cotes continues de 1,2; 1,3; 5,0; 10,0 seraient classées comme 1, 2, 3, 4). Nous avons ensuite mis à l'échelle les deux cotes de menaces cumulatives (c.-à-d. continues, transformées ou classées) de 0 à 1 afin de comparer visuellement les deux approches.

Des exemples de graphiques sommaires et de cartes ont été élaborés pour une approche initiale de visualisation des résultats en fonction des UC de saumon (en incluant seulement les cours d'eau en aval des obstacles naturels pour le saumon), des étendues des espèces en péril et des groupes de bassins hydrographiques du FWA. Nous avons produit des diagrammes de quartiles de Tukey pour montrer la répartition des cotes de menaces cumulatives et individuelles entre les cours d'eau associés à l'étendue des espèces. Nous avons cartographié les valeurs médianes des cotes de menaces cumulatives de l'activité humaine dans les groupes de bassins hydrographiques. Nous avons également calculé la prévalence de l'intrant de chaque activité humaine et de chaque perturbation du paysage et cartographié l'intrant le plus courant dans les groupes de bassins hydrographiques. Le paramètre de prévalence intègre l'occurrence généralisée, mais non l'intensité. Nous avons également mis en graphique la contribution moyenne des intrants (c.-à-d. d'après l'intensité relative des menaces accumulées par le débit) aux menaces de la destruction de l'habitat dans les cours d'eau, de la perturbation du milieu riverain, des éléments nutritifs, de la pollution et de la sédimentation entre les cours d'eau des groupes de bassins hydrographiques (figure 19). Nous avons exclu l'intrant de source diffuse des « autres non urbaines » pour les menaces accumulées par le débit des sommaires de la prévalence et de la proportion, car cette catégorie décrit toutes les couvertures terrestres qui n'avaient pas autrement de coefficients de contribution définis (p. ex. urbaine, forestière) et était donc intrinsèquement la plus dominante dans la majorité des bassins hydrographiques.

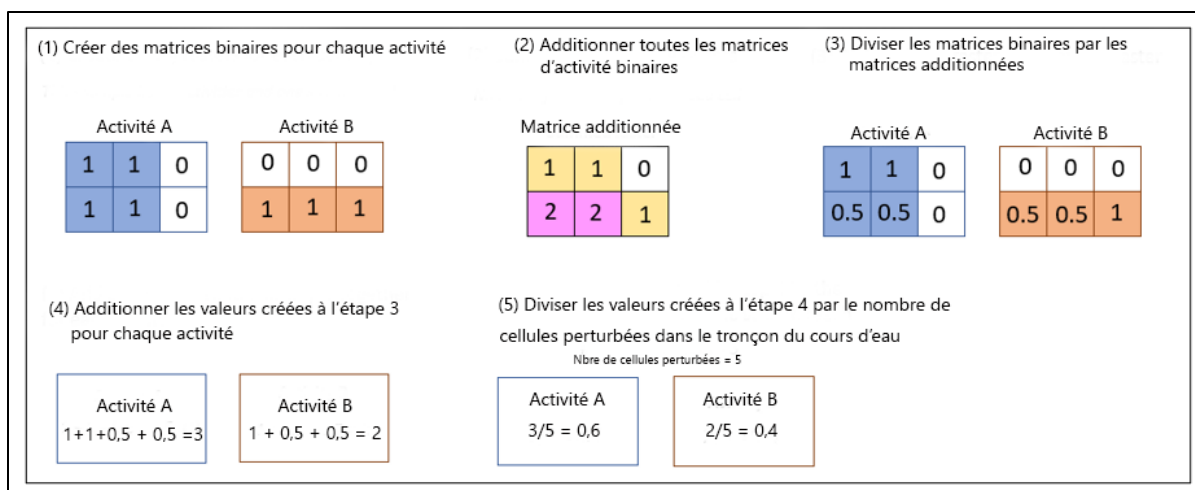


Figure 19. Calcul des contributions proportionnelles des intrants en fonction des estimations de la menace pour la destruction de l'habitat dans les cours d'eau et la perturbation du milieu riverain.

2.5. ÉVALUATION TEMPORELLE

Nous avons examiné les sources de données sur l'activité humaine et les perturbations du paysage afin de déterminer la capacité d'évaluer l'évolution des cotes des menaces au fil du temps. Nous avons présenté les données pour lesquelles il existe des séries chronologiques en donnant des exemples de cartes des différences entre :

1. l'utilisation des terres et la couverture terrestre pour 2018 (la première année avec des données fiables) et 2022 (la dernière année disponible au moment des analyses);
2. les périmètres des feux de forêt de 2008 à 2018 et de 2012 à 2022 (période de 10 ans correspondant aux années d'utilisation des terres et de couverture terrestre);
3. les blocs de coupe forestière de 2008 à 2018 et de 2012 à 2022;
4. la défoliation grave par les ravageurs forestiers de 2008 à 2018 et de 2012 à 2022.

Bon nombre des autres sources de données n'ont pas d'horodatage et ne se prêtent donc pas à l'analyse des séries chronologiques historiques (annexe C, tableau C1). Nous n'avons pas repris l'utilisation des cotes des menaces pour le moment, car la meilleure évaluation temporelle consistera à les utiliser comme référence et à les recalculer avec les ensembles de données actualisés à l'avenir.

2.6. UHE DE THOMPSON-NICOLA

Pour l'étude de cas de l'UHE de Thompson-Nicola, nous avons élaboré des exemples de la façon dont les cotes de menace individuelles et cumulatives peuvent être appliquées pour guider l'établissement des priorités de restauration et les mesures de gestion pour l'habitat du saumon. En particulier, nous nous sommes concentrés sur les activités humaines et les menaces qui peuvent raisonnablement être atténuées, notamment la perturbation du milieu riverain, le prélèvement d'eau et la fragmentation longitudinale. Nous avons cerné le chevauchement de ces menaces avec deux exemples de façons de déterminer les zones importantes pour le saumon :

1. en utilisant les délimitations des UC et
2. en utilisant un habitat modélisé de fraie favorable sur le plan de l'environnement (Iacarella et Weller 2023).

L'habitat de fraie favorable sur le plan de l'environnement pour le saumon du Pacifique dans l'UHE (saumon chinook, saumon coho, saumon rose, saumon rouge) a déjà été estimé à l'aide de modèles de niche environnementale pour les tronçons de cours d'eau de 4^e ordre ou plus dans les conditions actuelles et futures (Iacarella et Weller 2023). Les modèles de niche environnementale caractérisent la niche écologique et ne visent pas à définir précisément la répartition actuelle d'une espèce; ils sont axés sur les changements climatiques à grande échelle et sur la projection des décalages provoqués par les changements climatiques. Les cotes de favorabilité environnementale sont calculées comme une fonction de la probabilité de présence et de prévalence de l'espèce, les cotes de favorabilité supérieures à 0,5 indiquant que les conditions locales donnent une probabilité de présence plus élevée que prévu d'après la prévalence globale. (Iacarella et Weller 2023). Ces modèles ont été élaborés pour la C.-B. jusqu'à l'étendue des aires de répartition au sud des États-Unis à l'aide des observations de la fraie et des variables environnementales principales de la température moyenne des cours d'eau en août, des précipitations annuelles moyennes, de la distance jusqu'à l'océan et aux lacs (pour le saumon rouge), du gradient des cours d'eau et de la superficie du bassin hydrologique (Iacarella et Weller 2023). Les modèles ont été ajustés en utilisant uniquement des tronçons de cours d'eau accessibles et les conditions environnementales de référence (de 1981 à 2020) correspondant à la période d'observation de la fraie du saumon. Des comparaisons de scénarios climatiques futurs ont été projetées pour des périodes de 20 ans de 1981 à 2100 pour tous les tronçons de cours d'eau (y compris les tronçons inaccessibles et de 4^e ordre ou plus Iacarella et Weller 2023); tous les tronçons de cours d'eau ont été cartographiés en comparant les projections actuelles et futures. L'habitat de croissance des juvéniles n'a pas été intégré dans ces modèles, mais c'est une autre valeur importante du saumon dont il faut tenir compte dans la planification de la gestion et de la restauration de l'habitat.

Nous avons combiné de façon multiplicative les cotes des menaces et modélisé la favorabilité environnementale pour la fraie du saumon afin de créer des cotes composites qui correspondaient à un gradient des conséquences potentielles pour la gestion (figure 20). Par exemple, une cote de menace élevée combinée à une probabilité élevée d'habitat favorable indique une zone qui justifie une étude localisée et des mesures potentielles de restauration ou d'atténuation. À l'inverse, une faible cote de menace combinée à une faible probabilité d'habitat favorable dénote une zone à laquelle la gestion devrait probablement moins s'intéresser compte tenu de cette valeur pour le saumon (c.-à-d. l'habitat de fraie prévu). Il est préférable d'examiner séparément les cotes composites intermédiaires pour déterminer si la zone a une cote de menace faible et une probabilité d'habitat favorable élevée ou l'inverse; deux situations qui ont des conséquences différentes pour la gestion (figure 20). Lorsque les deux cotes varient dans des directions opposées (l'une augmente dans l'espace et l'autre diminue), les cotes les plus élevées se produiront à des valeurs intermédiaires (p. ex. $0,5 \times 0,5 = 0,25$) et les plus faibles se rencontreront lorsqu'une cote est élevée et l'autre, faible (p. ex. $0,1 \times 0,9 = 0,09$). Il s'agit d'une approche plus informative qu'additive pour combiner les cotes, car ces scénarios donneraient les mêmes valeurs sur l'ensemble du gradient au moment de l'addition (p. ex. $0,5 + 0,5 = 1$; $0,1 + 0,9 = 1$). Dans les cas appliqués ici, il n'y avait pas de valeur de 0. Cette approche multiplicative a été appliquée aux cotes de menaces cumulatives fondées sur l'activité humaine, aux cotes des intrants riverains et aux cotes de la fragmentation pour les espèces anadromes. Nous avons également utilisé une approche multiplicative pour évaluer les prélèvements d'eau et les conditions de faible débit qui coïncident dans l'espace. Dans ce cas-ci, nous avons superposé la cote composite avec les étendues des UC afin de réduire la complexité, plutôt que de multiplier également cette cote composite par la favorabilité environnementale modélisée.

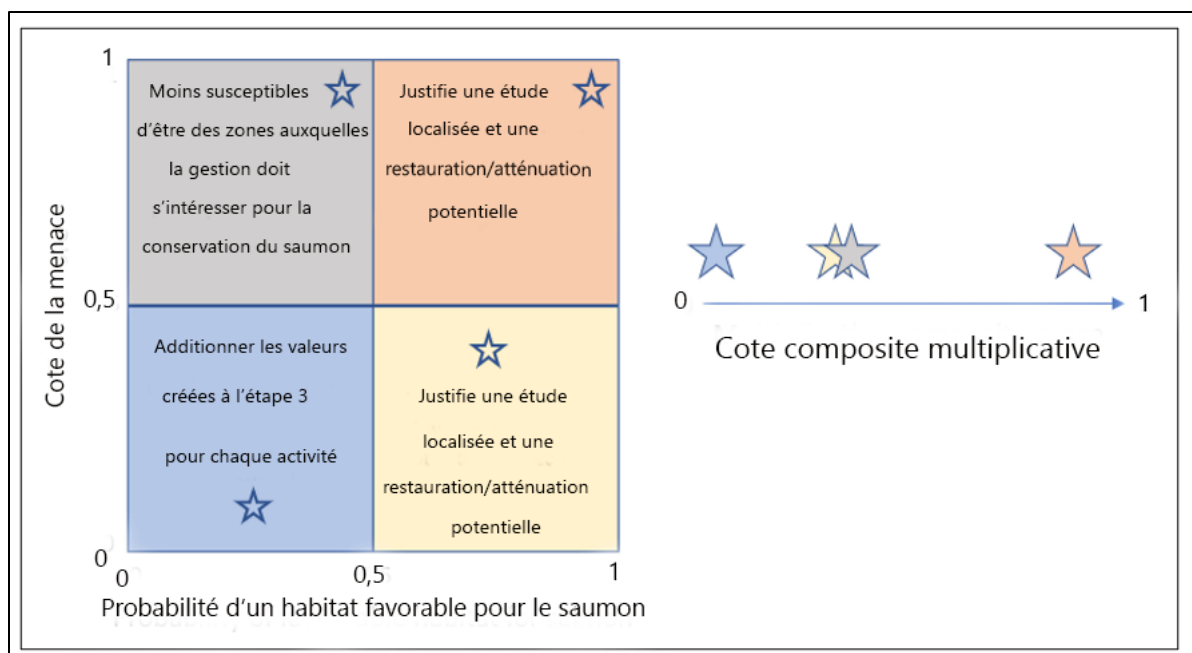


Figure 20. Rubrique des conséquences potentielles pour la gestion, indiquées par la combinaison multiplicative des cotes de menace avec les valeurs de l'habitat du saumon, comme l'habitat favorable modélisé. Les symboles d'étoiles le long du gradient de la cote composite multiplicative représentent une approximation de leur distribution relative de 0 à 1, en fonction de la rubrique codée par couleur, avec des exemples d'emplacements.

Pour les cotes de menaces cumulatives, nous avons d'abord appliqué les menaces individuelles et cumulatives aux UC de saumon (en incluant seulement les cours d'eau en aval des obstacles naturels pour le saumon) et indiqué graphiquement pour quelles UC on prédit des menaces plus élevées, comme cela a été fait pour le BFF. Nous avons ensuite combiné de façon multiplicative les cotes de menaces cumulatives fondées sur l'activité humaine (à l'exclusion de la fragmentation longitudinale pour les espèces résidentes) avec les cotes de la favorabilité environnementale (cours d'eau de 4^e ordre ou plus) dans les conditions de référence (de 1981 à 2020) pour les cours d'eau accessibles, les conditions climatiques actuelles (de 2001 à 2020) pour tous les cours d'eau, et les conditions climatiques futures (de 2041 à 2060; RCP 4.5) pour tous les cours d'eau (« cote composite cumulative des menaces »). Nous avons utilisé la cote médiane dans les groupes de bassins hydrographiques pour fournir une indication des bassins hydrographiques estimés comme contenant un habitat favorable élevé où les menaces cumulatives sont également élevées. Nous avons présenté les résultats fondés sur les cours d'eau accessibles pour donner une indication des cotes relatives actuelles entre les bassins hydrographiques et les espèces, et les résultats fondés sur les conditions climatiques actuelles et futures pour tous les cours d'eau à des fins de comparaison en fonction des décalages prévus de la favorabilité environnementale pour la fraie du saumon et en tenant compte du fait que certains obstacles (c.-à-d. les barrages) peuvent être atténués.

Nous avons créé une cote semblable pour les intrants riverains (« cote composite des intrants riverains ») afin d'aider à déterminer les endroits où la restauration riveraine peut être nécessaire en fonction

1. des intrants de sources diffuses d'éléments nutritifs, de pollution et de sédimentation et des niveaux de perturbation du milieu riverain correspondants et
2. de la favorabilité environnementale pour la fraie du saumon.

Cette cote était axée sur les estimations des endroits où les intrants de sources diffuses étaient les plus importants et où la capacité de filtrage des zones riveraines était potentiellement perdue en raison de la perturbation du milieu riverain (p. ex. les résultats de la figure 17 jusqu'à l'étape 3). Nous n'avons inclus que les cours d'eau associés à une certaine perturbation du milieu riverain (cote de perturbation du milieu riverain >0). Les sources ponctuelles n'ont pas été incluses dans cette cote, car on a présumé que le filtrage riverain ne préviendrait pas les intrants de sources ponctuelles. Nous avons multiplié la cote des intrants riverains (somme des cotes mises à l'échelle pour les intrants de sources diffuses d'éléments nutritifs, de pollution et de sédimentation dans l'UHE) par la cote de la favorabilité environnementale pour la fraie du saumon dans les tronçons accessibles dans les conditions de référence (de 1981 à 2020) et les résultats cartographiés. La cote des intrants riverains se rapporte à la valeur de filtrage des zones tampons riveraines, mais ne tient pas compte de la fonction des zones tampons riveraines dans la création d'ombrage sur les cours d'eau pendant les mois d'été. La perte de l'ombrage sur les cours d'eau riverains pour mieux guider les efforts de restauration peut être estimée à l'aide de la télédétection à haute résolution, comme le LiDAR (Seixas *et al.* 2018), et a également été estimée à une résolution plus grossière à l'aide de données satellitaires (Iacarella *et al.* 2024).

Nous avons élaboré une autre cote (« cote composite pour les ressources en eau ») pour l'occurrence combinée du prélèvement d'eau autorisé (faisant partie de la menace de la modification du débit) et des débits faibles projetés dans les conditions historiques (de 1981 à 2010) et futures (de 2040 à 2060; RCP 4.5 et 8.5). Nous avons multiplié l'inverse du %DAM minimal mensuel sur l'année pour chaque tronçon de cours d'eau par les quantités de prélèvement d'eau autorisées correspondantes dans chaque bassin hydrographique fondamental; une cote élevée indiquait un pourcentage faible du %DAM mensuel et un prélèvement d'eau autorisé élevé. Nous avons ensuite pris le $\log_{10}(x+1)$ pour réduire l'asymétrie et nous l'avons mis à l'échelle pour calculer une cote de menace. Nous avons superposé cette cote avec les UC de saumon et visualisé les résultats avec des cartes et des graphiques. L'estimation de la cote composite pour les ressources en eau était améliorée si on reliait la quantité mensuelle d'extraction d'eau aux niveaux de débit mensuels. Cependant, cette information n'était pas facilement disponible dans la mesure nécessaire, de sorte que le calcul de la cote composite a fourni les valeurs les plus élevées si on reliait la quantité totale d'extraction d'eau autorisée aux débits les plus faibles sur l'année. Les itérations futures pourraient estimer le moment du prélèvement d'eau en procédant à une classification par saison en fonction du type de prélèvement (p. ex. agricole).

Enfin, nous avons utilisé une cote multiplicative pour la menace de la fragmentation longitudinale pour les espèces anadromes et la favorabilité environnementale pour la fraie du saumon (« cote composite de la fragmentation pour les espèces anadromes »). Cette cote indique les obstacles qui bloquent potentiellement la plus grande étendue d'habitat favorable. Elle utilise la menace élaborée à l'origine, mais concentre la cote multiplicative uniquement sur la portion du réseau de cours d'eau, du barrage initial à l'obstacle suivant (barrage ou obstacle naturel) en amont. Les cotes moyennes de la favorabilité environnementale pour la fraie des tronçons en amont pour chaque espèce de saumon dans les conditions climatiques actuelles (de 2001 à 2020) et futures (de 2041 à 2060; RCP 4.5 et 8.5) ont ensuite été multipliées par la longueur du cours d'eau de ces parcelles de réseau bloquées et le $\log_{10}(x)$ de cette valeur a été normalisé pour la cote composite finale de la fragmentation pour les espèces anadromes. Ces résultats ont été visualisés graphiquement.

3. RÉSULTATS

3.1. MENACES DE L'ACTIVITÉ HUMAINE ET DE LA PERTURBATION DU PAYSAGE

Les menaces fondées sur l'activité humaine et la perturbation du paysage ont été élaborées pour 578 031 tronçons de cours d'eau (bassins hydrographiques fondamentaux) sur les 644 594 que compte le BFF, soit 90 %, représentant 384 619 km de tronçons de cours d'eau ou 87 % de la longueur du réseau du BFF. Les 10 % restants représentaient les bassins hydrographiques aux États-Unis qui ont été ajoutés pour modéliser les régimes de drainage pour l'ensemble du BFF (Weller *et al.* 2023), les bassins hydrographiques qui étaient trop petits pour être associés aux données rastérisées sur l'activité humaine et la perturbation du paysage, les bassins hydrographiques qui n'étaient pas associés à un tronçon de cours d'eau et les bassins hydrographiques dont des tronçons de cours d'eau étaient exclus (p. ex. lacs, débits souterrains).

Les cartes des cotes des menaces pour les tronçons de cours d'eau révélaient une variation géographique de l'intensité sur l'ensemble du BFF selon la menace (les légendes des figures sont mises à l'échelle pour mettre en évidence le gradient des cotes propres à chaque menace; figures 21 à 30). Les cotes de la menace des EAE supérieures à 0 étaient en grande partie limitées au bas Fraser, avec quelques parcelles dans l'est du BFF (figure 21). Les cotes des menaces de la modification du débit et de la fragmentation latitudinale suivaient généralement les plus grands cours d'eau, notamment le Fraser, la rivière Thompson et la rivière Nechako (figures 22, 24). Les cotes des menaces de la destruction de l'habitat dans les cours d'eau et de la perturbation du milieu riverain étaient supérieures à 0 pour la plus grande partie du BFF, et les cotes les plus élevées coïncidaient avec les élévations faibles à moyennes, en particulier le plateau intérieur qui s'étend de l'angle nord-ouest à l'angle sud-est du BFF (figures 23, 27). Les cotes de la fragmentation longitudinale étaient plus élevées le long du plateau intérieur, autour du bas Fraser et dans le bassin hydrographique principal de la rivière Nechako (figures 24, 25). Les cotes de la charge en éléments nutritifs étaient élevées dans le plateau intérieur, le bas Fraser et les tronçons supérieurs du BFF (figure 28). Les cotes de la charge en pollution étaient relativement faibles pour la majeure partie du BFF, avec des concentrations plus élevées autour du bas Fraser et du centre du BFF (figure 29). Des niveaux relativement élevés de sédimentation d'origine humaine ont été estimés dans l'ensemble du BFF (figure 30). Enfin, la cote des menaces cumulatives a mis en évidence des niveaux de menace élevés dans le bas Fraser et le plateau intérieur (figure 31). Les deux approches de cumul des menaces pour les cotes cumulatives (c.-à-d. les cotes continues, les cotes transformées par rapport aux cotes classées) ont produit des profils spatiaux globalement similaires dans les niveaux des cotes, avec des différences spatiales principalement dans les régions ayant des valeurs intermédiaires (figure 32). Il y avait également plus de valeurs dans la fourchette supérieure (cotes des menaces cumulatives mises à l'échelle > 0,5) et inférieure (< 0,08) avec la méthode de classement.

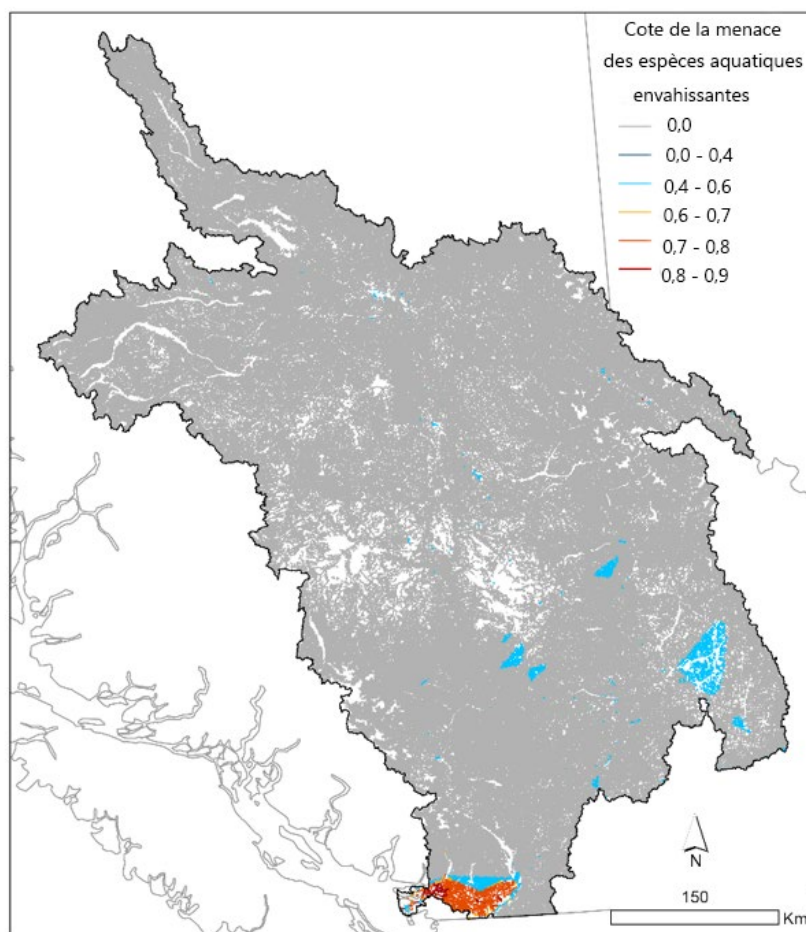


Figure 21. Cote de l'exposition à la menace des espèces aquatiques envahissantes. Les cotes transformées et mises à l'échelle de 0 à 1 indiquent une augmentation de la richesse en espèces non indigènes d'après les répartitions estimées.

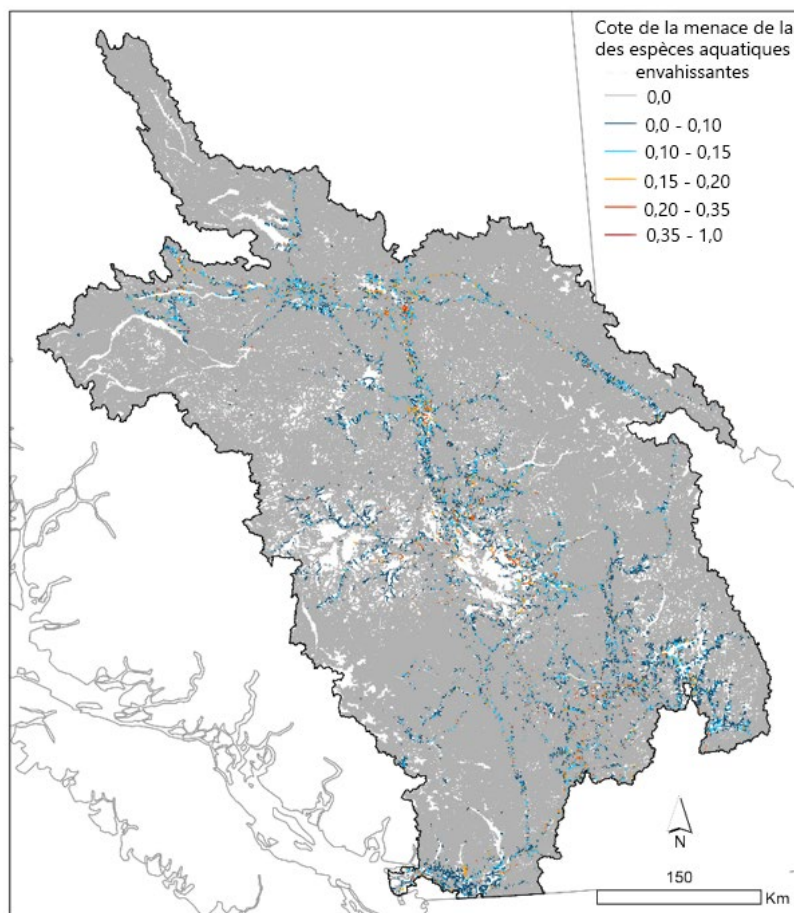


Figure 22. Cote de l'exposition à la menace de la modification du débit. Les cotes transformées et mises à l'échelle de 0 à 1 indiquent une augmentation de la modification du débit par les ponceaux (variation de la vitesse de l'eau), les barrages (variation de la quantité d'eau) et l'extraction d'eau (variation de la quantité d'eau).

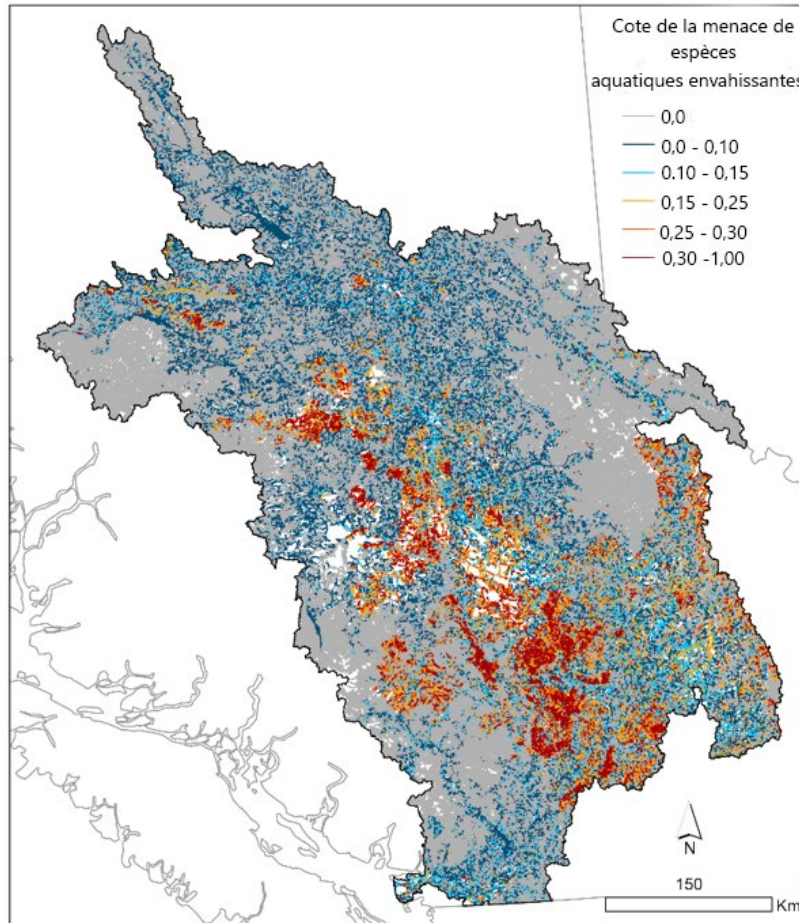


Figure 23. Cote de l'exposition à la menace de la destruction de l'habitat dans les cours d'eau. Les cotes transformées et mises à l'échelle de 0 à 1 indiquent une augmentation de la destruction de l'habitat dans les cours d'eau estimée en fonction des empreintes de l'activité humaine et de la perturbation du paysage qui chevauchent les étendues des cours d'eau.

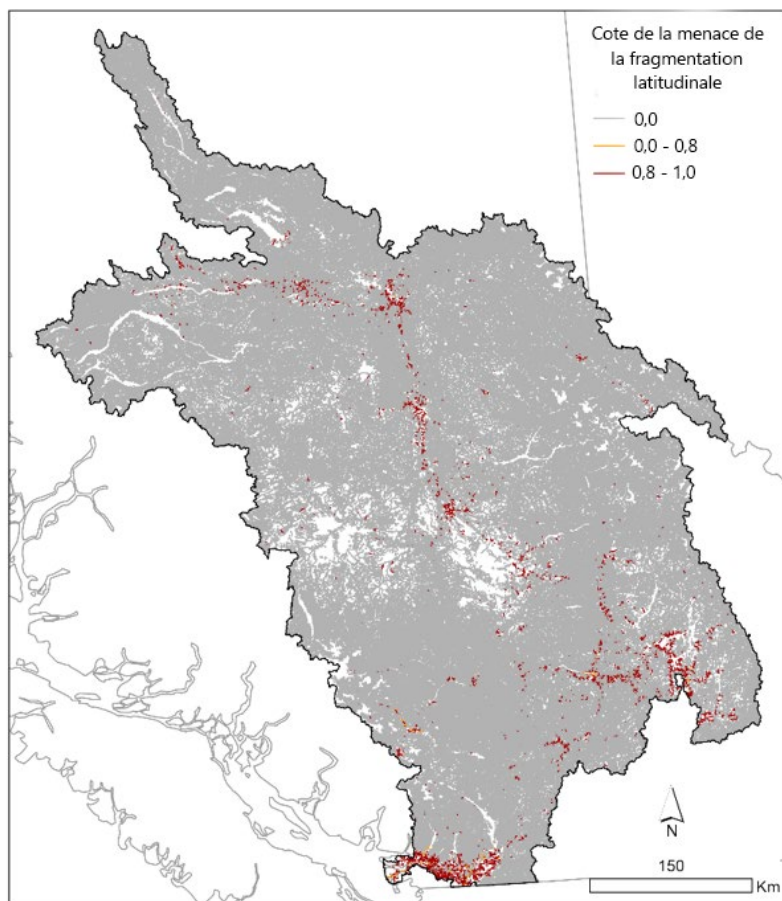


Figure 24. Cote de l'exposition à la menace de la fragmentation latitudinale. Les cotes transformées et mises à l'échelle de 0 à 1 indiquent une plus grande déconnexion possible de l'habitat de plaine inondable causée par les barrières de protection contre les inondations et l'utilisation des terres urbaines.

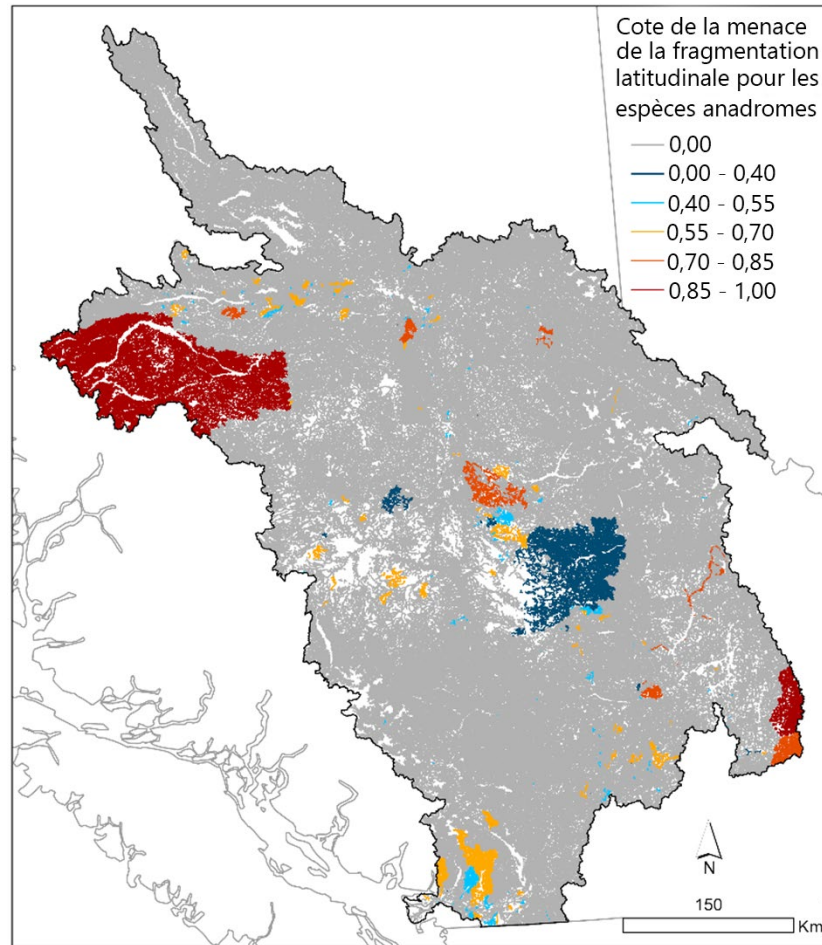


Figure 25. Cote de l'exposition à la menace de la fragmentation longitudinale pour les espèces anadromes. Les cotes transformées et mises à l'échelle de 0 à 1 indiquent que le réseau de cours d'eau bloqué est plus long d'après l'étendue entre le premier obstacle complet créé par un barrage en amont de l'entrée dans l'océan et l'obstacle suivant (barrage ou obstacle naturel). Les cotes ont été appliquées aux cours d'eau en amont des barrages subséquents, mais en aval des obstacles naturels.

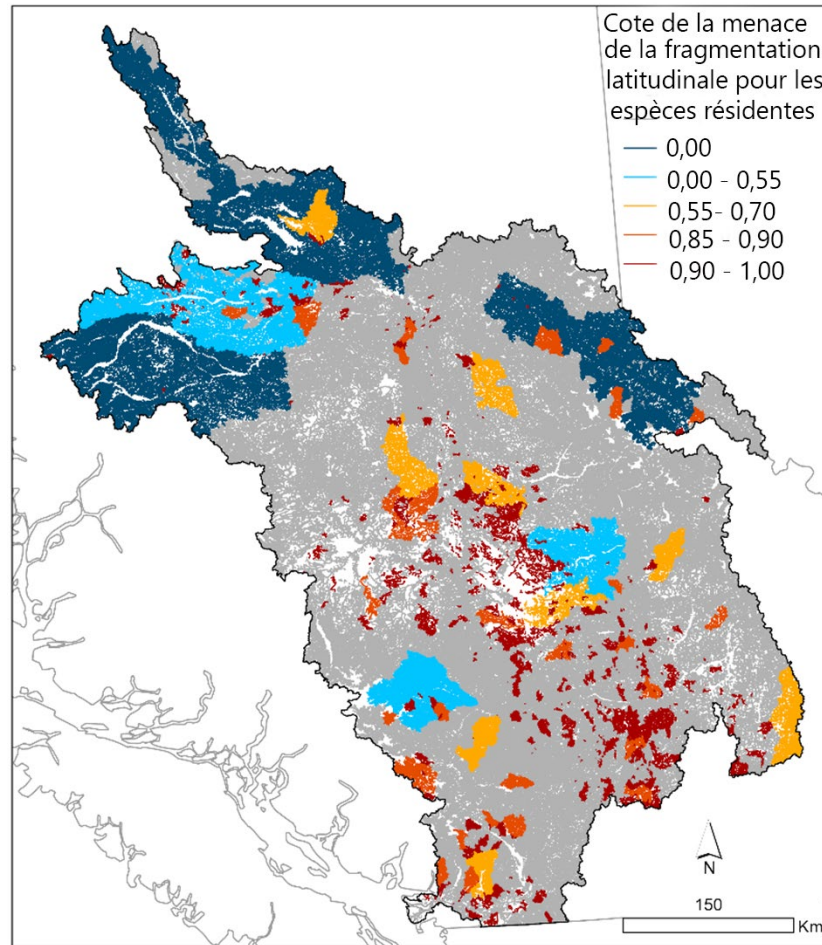


Figure 26. Cote de l'exposition à la menace de la fragmentation longitudinale pour les espèces résidentes. Les cotes transformées et mises à l'échelle de 0 à 1 indiquent des longueurs de cours d'eau connectées plus courtes entre les barrages créant un obstacle complet et des obstacles naturels.

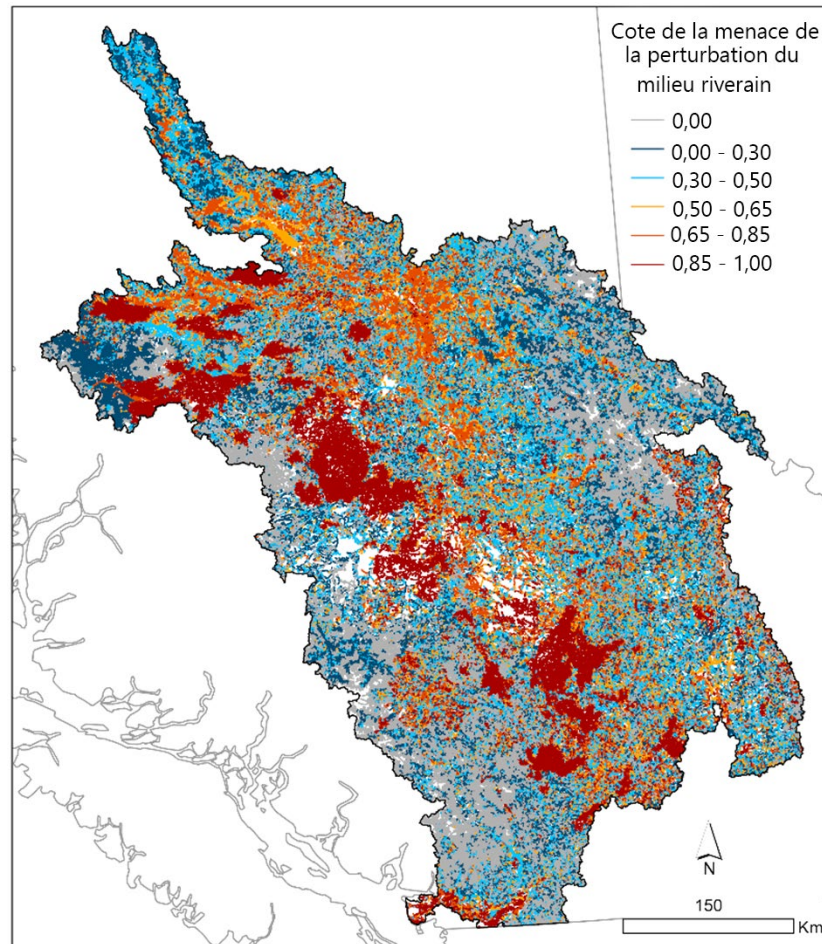


Figure 27. Cote de l'exposition à la menace de la perturbation du milieu riverain. Les cotes transformées et mises à l'échelle de 0 à 1 indiquent une augmentation de la perturbation du milieu riverain estimée d'après les empreintes de l'activité humaine et de la perturbation du paysage qui chevauchent les zones tampons riveraines (dans un rayon de 30 m des tronçons de cours d'eau).

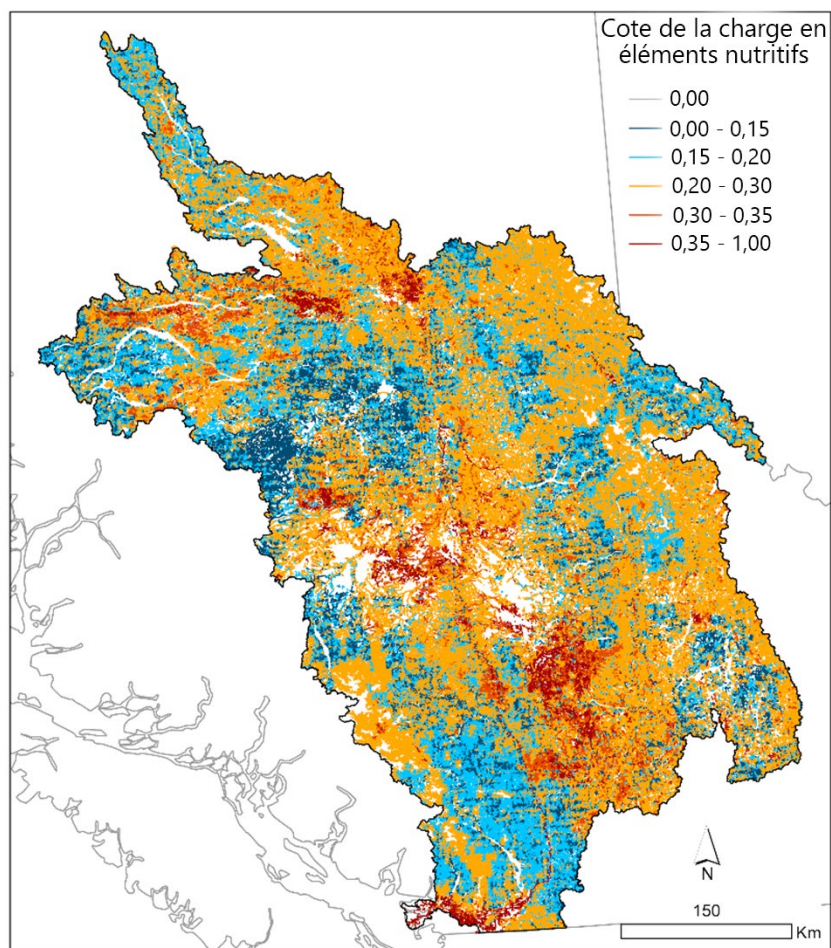


Figure 28. Cote de la charge en éléments nutritifs d'origine humaine. Les cotes transformées et mises à l'échelle de 0 à 1 indiquent une augmentation estimée de la charge en éléments nutritifs provenant de sources ponctuelles et diffuses.

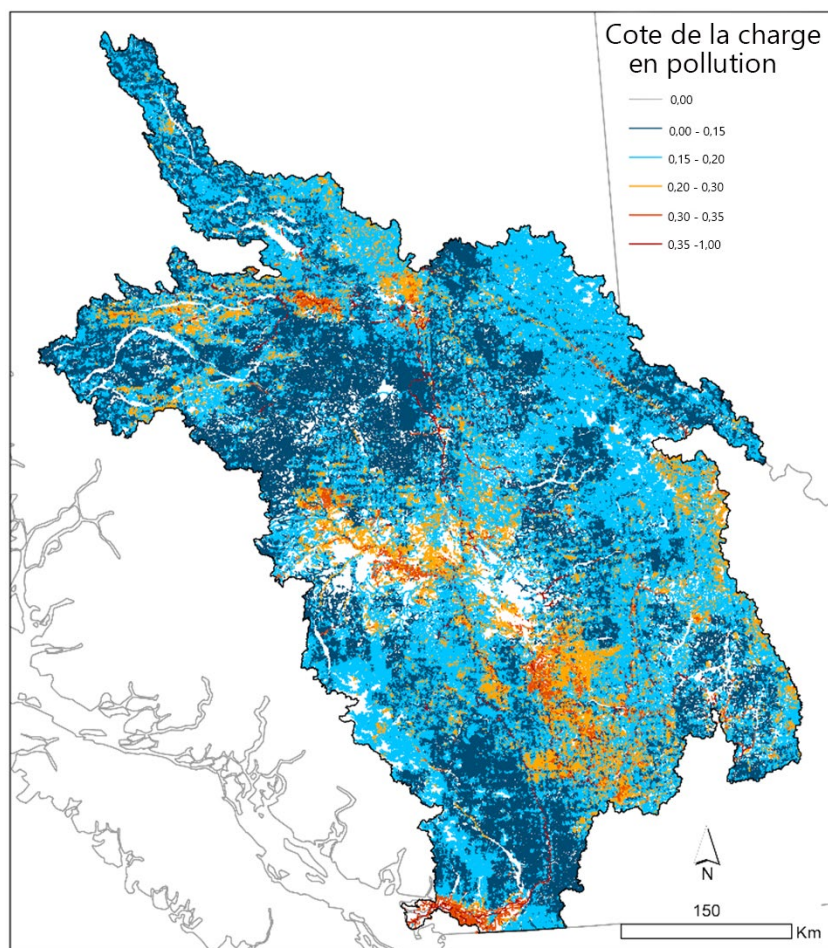


Figure 29. Cote de la charge en pollution. Les cotes transformées et mises à l'échelle de 0 à 1 indiquent une augmentation estimée de la charge en pollution provenant de sources ponctuelles et diffuses.

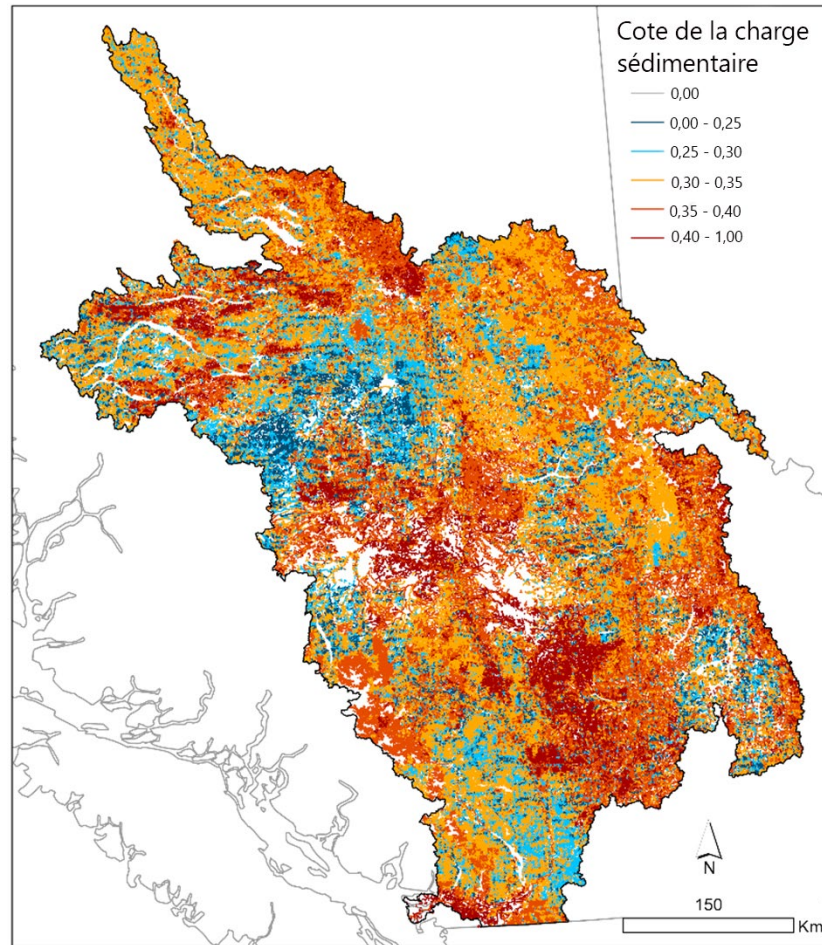


Figure 30. Cote de la charge en sédiments d'origine humaine. Les cotes transformées et mises à l'échelle de 0 à 1 indiquent une augmentation estimée de la charge en sédiments provenant de sources ponctuelles et diffuses.

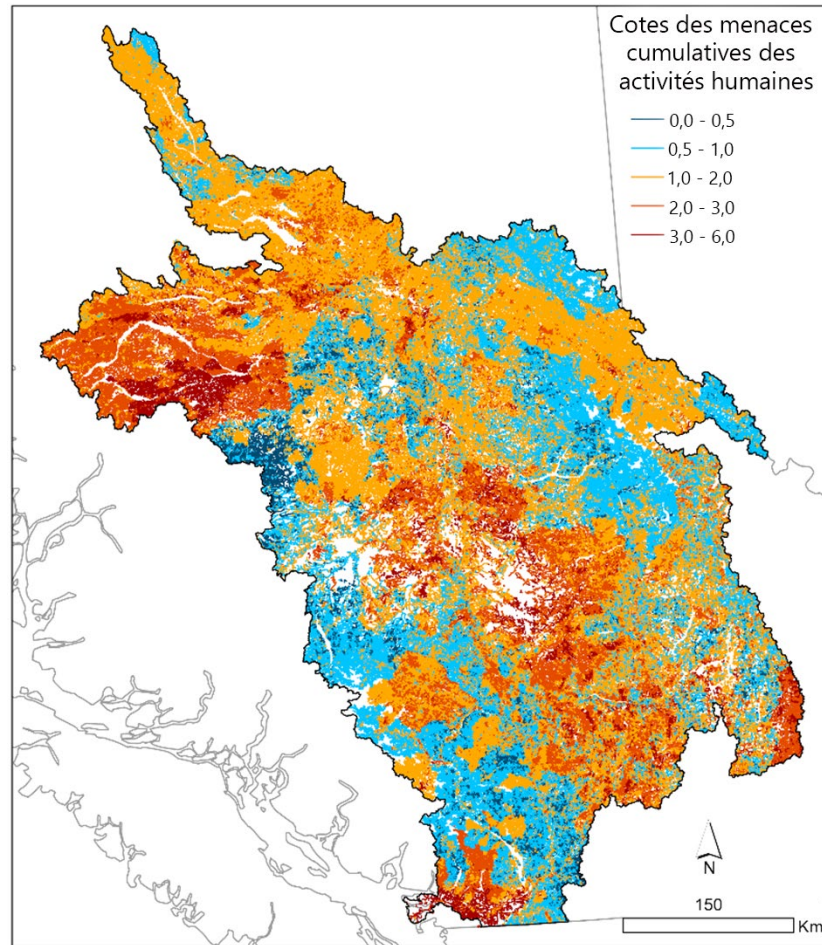


Figure 31. Cote des menaces cumulatives additives fondée sur l'activité humaine et la perturbation du paysage.

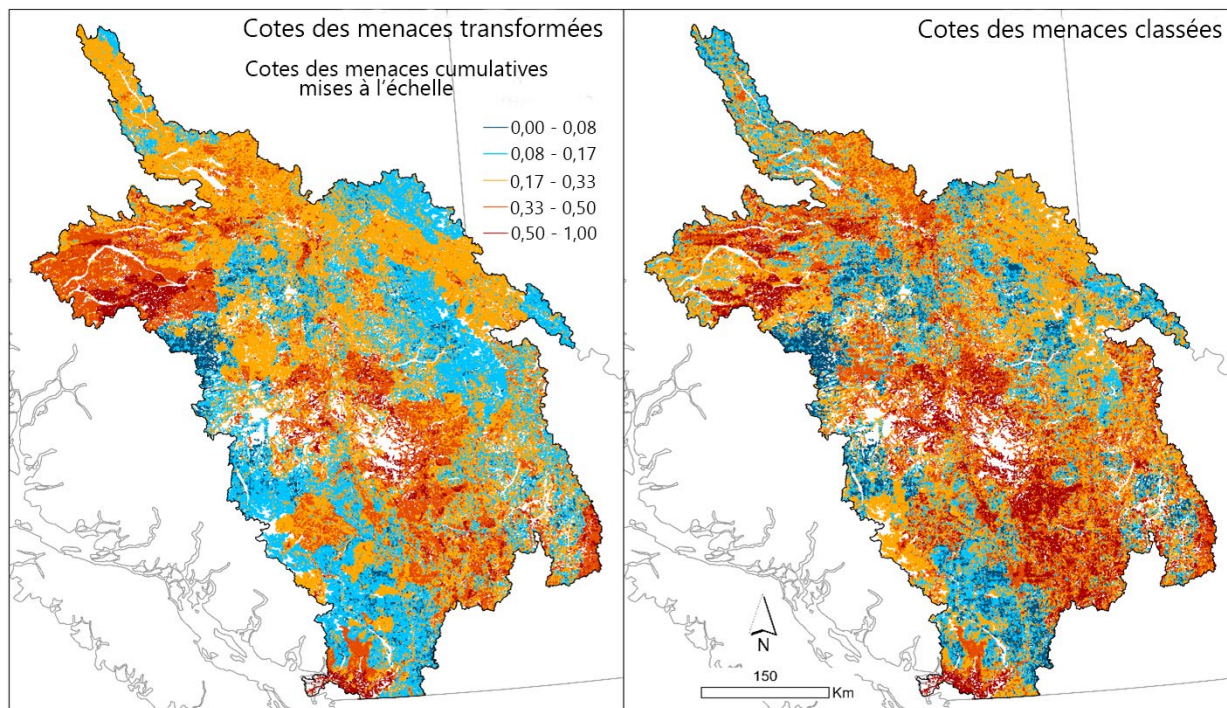


Figure 32. Cotes des menaces cumulatives de l'activité humaine et de la perturbation du paysage mises à l'échelle, fondées sur le cumul (a) des cotes continues et des cotes transformées et (b) des cotes classées. Les symboles de la légende s'appliquent aux deux cartes.

3.2. MENACES LIÉES AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Des menaces fondées sur les changements climatiques ont été élaborées pour 243 856 tronçons de cours d'eau (c.-à-d. les bassins hydrographiques fondamentaux; 38 %) des 644 594 recensés dans le BFF en fonction des limites des bassins hydrologiques d'au moins 1 km², soit 171 181 km de tronçons de cours d'eau ou 39 % de la longueur du réseau de cours d'eau du BFF.

Le risque d'inondation déterminé par le niveau d'eau en surface indiquait des niveaux plus élevés le long du bas et du haut Fraser, et des affluents supérieurs des rivières Thompson, Nechako et Stuart dans les conditions historiques (figure 33a). L'élévation des niveaux d'eau en surface était prévue pour ces mêmes zones dans les conditions climatiques futures, sauf pour le haut Fraser; le Fraser central et la rivière Chilcotin, où ces niveaux devraient diminuer selon le profil RCP 4.5 (figure 33b). La différence la plus notable entre les profils RCP 4.5 et 8.5 était une élévation du niveau d'eau le long du Fraser central plutôt qu'une baisse (figure 33b-c).

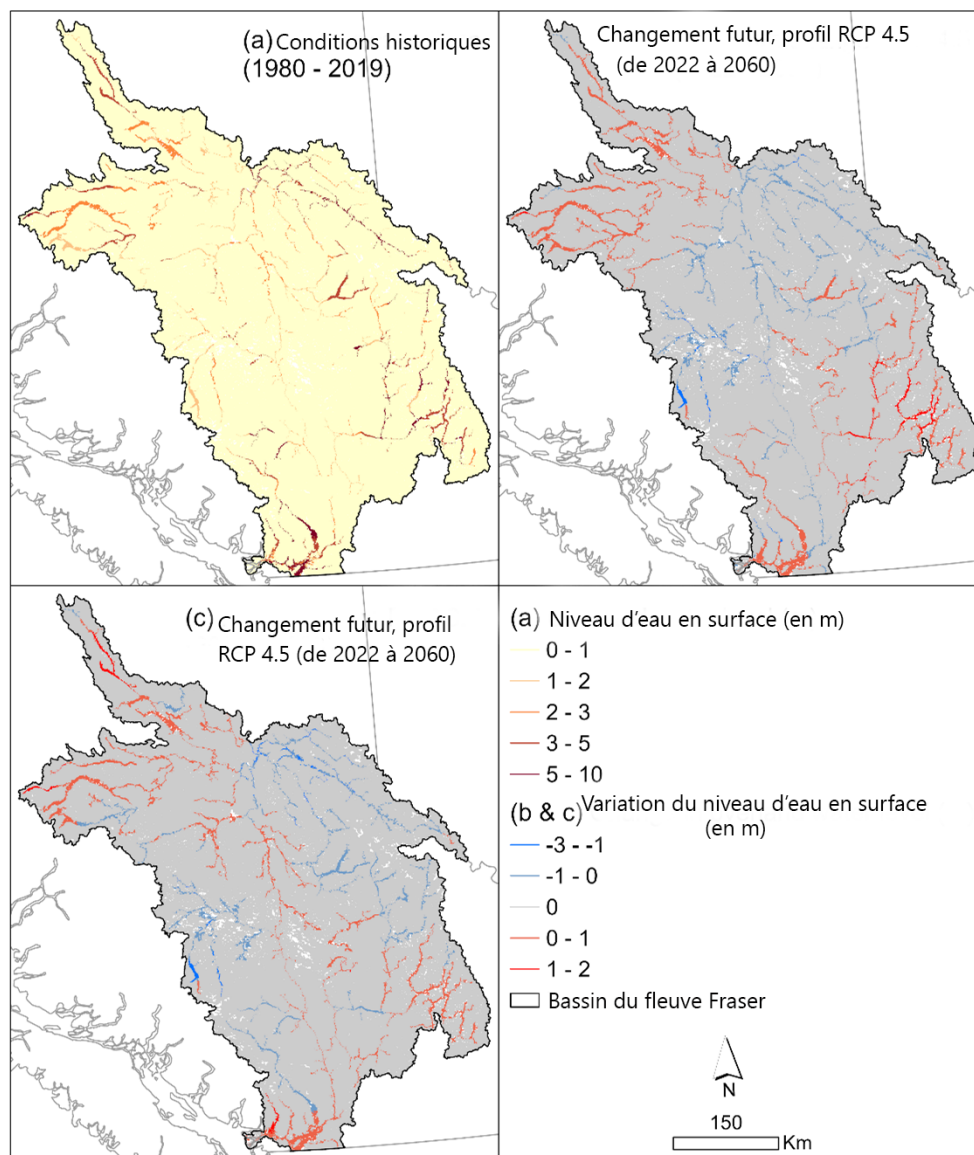


Figure 33. Menace de risque d'inondation fondée sur la modélisation (a) du niveau d'eau en surface historique (de 1980 à 2019) et de la variation prévue de ce niveau (entre les périodes de 1980 à 2019 et de 2022 à 2060) pour une période de retour de 100 ans selon (b) le profil RCP 4.5 et (c) le profil RCP 8.5. Le changement absolu du niveau d'eau en surface a été transformé et mis à l'échelle de sorte qu'une cote plus élevée indiquait une variation plus importante (positive ou négative).

Les cartes illustrant le %DAM mensuel minimum ont mis en évidence le bas et le haut Fraser comme des zones où le %DAM mensuel est faible (<10 %; figure 34). Le changement le plus notable du %DAM mensuel minimum en août entre les conditions historiques et futures était une expansion des faibles valeurs mensuelles du %DAM dans le sud du BFF, avec peu de différence entre les profils RCP 4.5 et 8.5 (figure 35). Le %DAM mensuel maximal pour le mois de mai affichait les valeurs les plus élevées dans le nord du BFF, avec des valeurs modérées du %DAM mensuel dispersées dans l'ensemble du BFF; les tendances du %DAM mensuel alternaient entre les mois intermédiaires d'avril à juin (figure 36). Le %DAM mensuel maximal de mai n'a pas beaucoup changé entre les conditions historiques et futures, et était semblable entre les profils RCP 4.5 et 8.5 (figure 37).

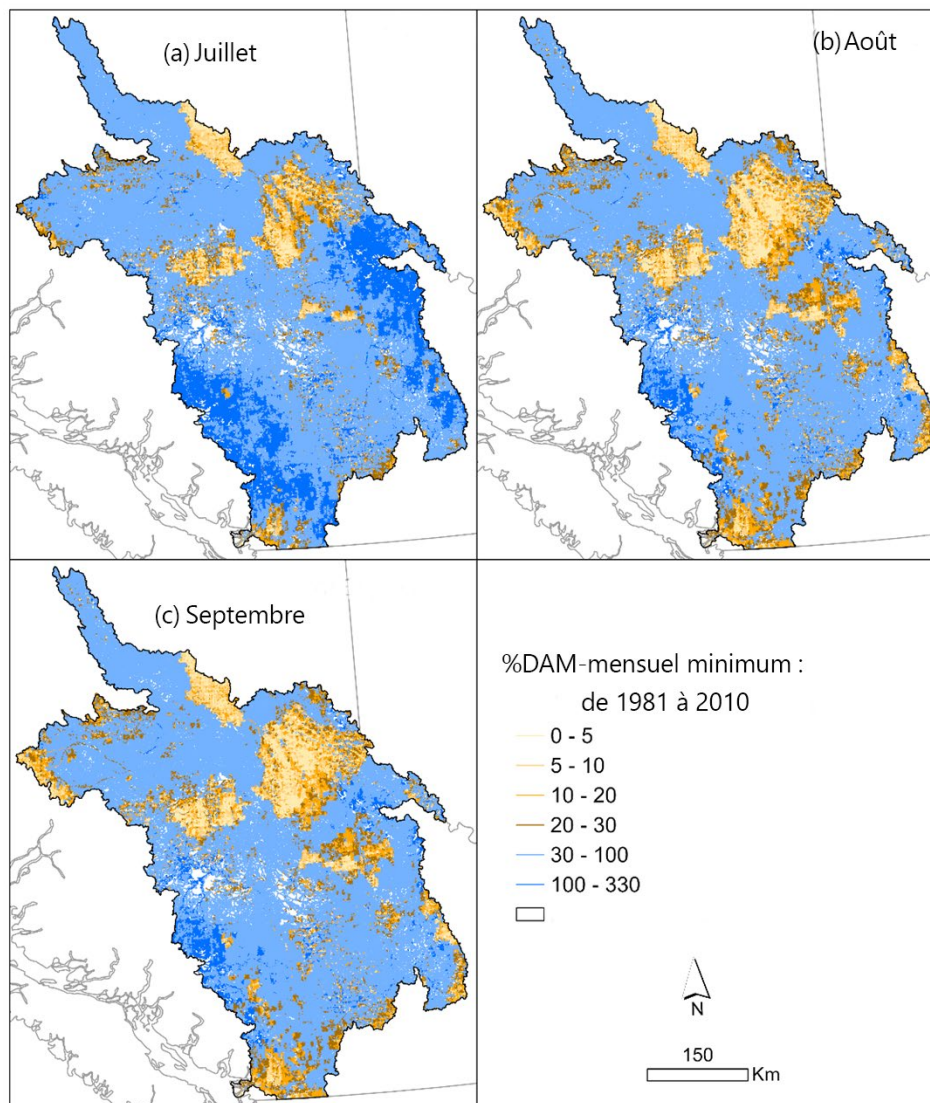


Figure 34. %DAM mensuel minimum modélisé (calculé comme le débit mensuel moyen sur l'année) pour les conditions climatiques moyennes de 1981 à 2010 pendant les mois d'été à faible débit : (a) juillet, (b) août et (c) septembre.

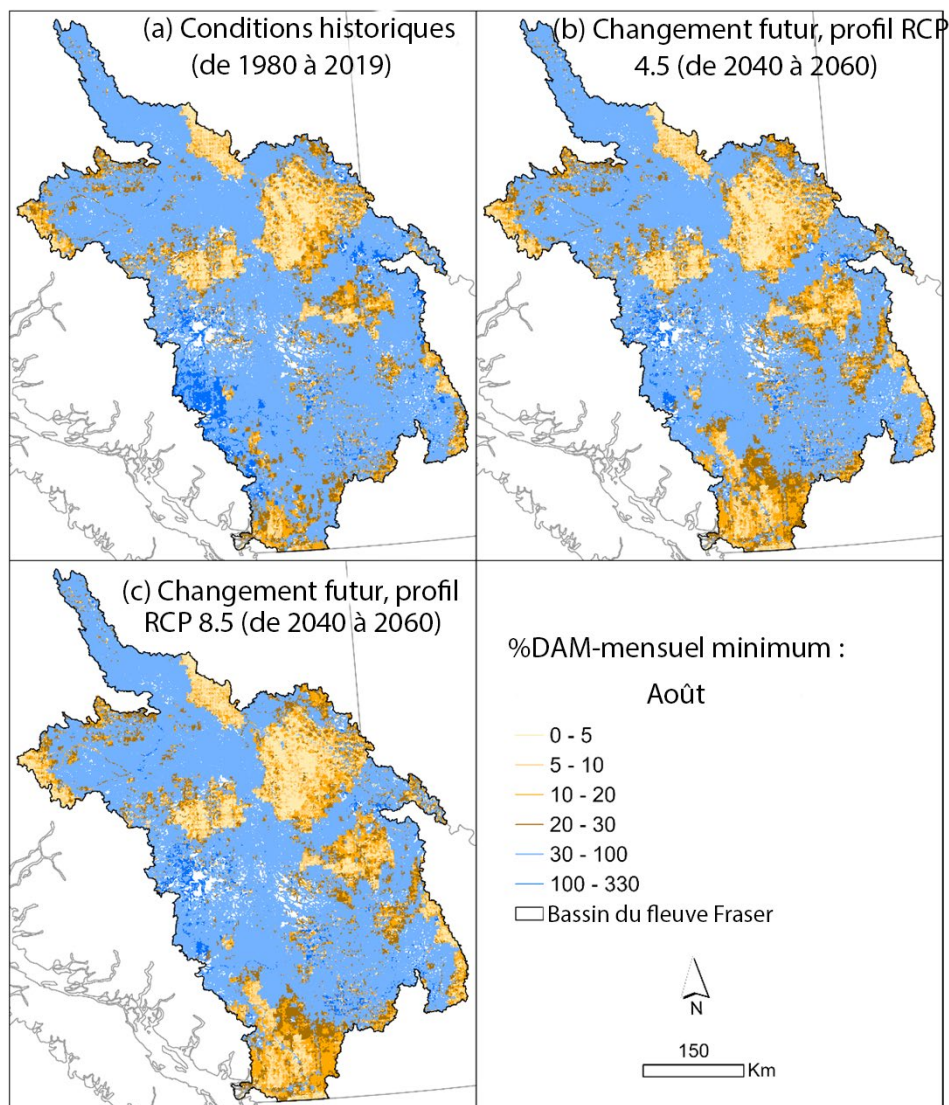


Figure 35. Menace du débit faible d'après le %DAM mensuel minimal d'août modélisé (calculé comme le débit mensuel moyen sur l'année) pour les conditions climatiques moyennes (a) de 1981 à 2010 et de 2040 à 2060 selon (b) le profil RCP 4.5 et (c) le profil RCP 8.5. Nous avons calculé le %DAM mensuel projeté futur par rapport à la période historique (de 1981 à 2010). Les cotes de la menace du débit faible (fondées sur les valeurs cartographiées présentées ici) ont été transformées et mises à l'échelle inversée de 0 à 1, de sorte qu'une cote plus élevée indiquait des débits minimaux plus faibles.

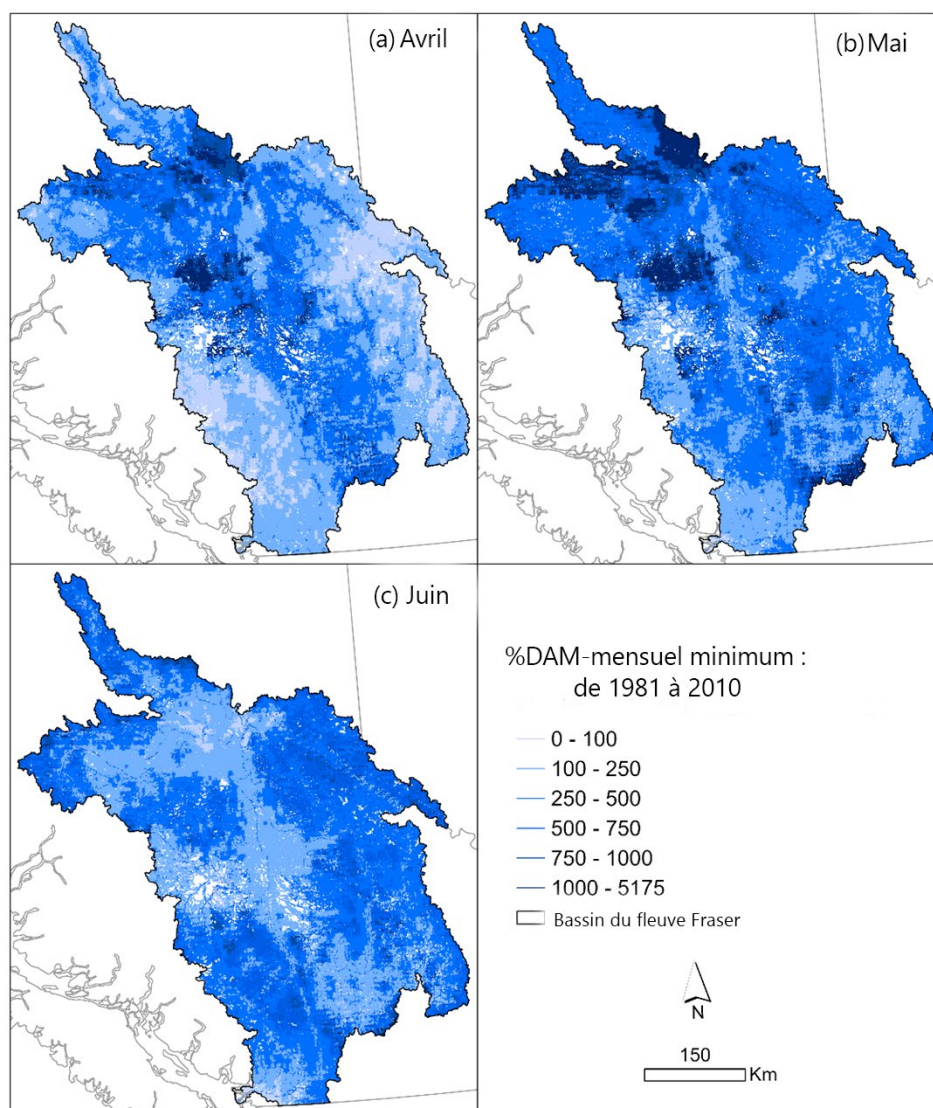


Figure 36. %DAM mensuel maximum modélisé (calculé comme le débit mensuel moyen sur l'année) pour les conditions climatiques moyennes de 1981 à 2010 pendant les mois à débit élevé : (a) avril, (b) mai et (c) juin.

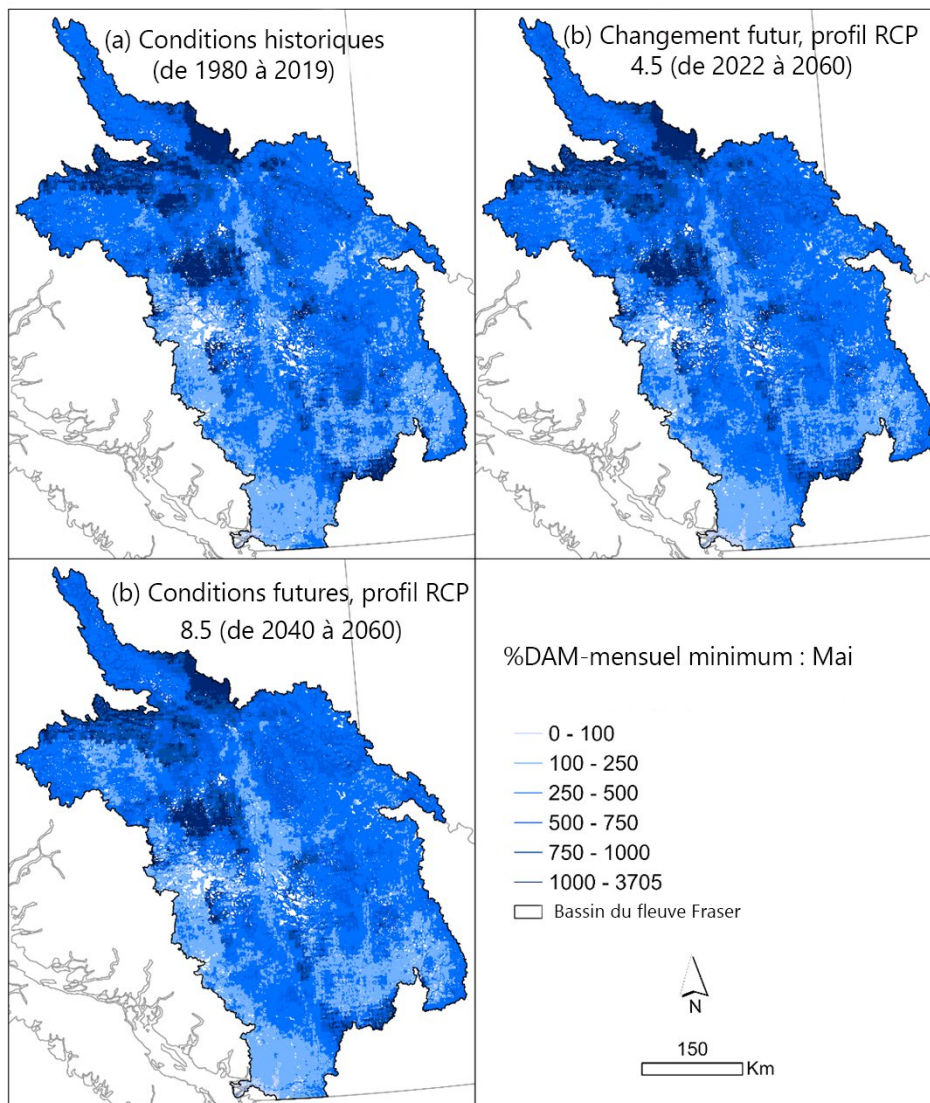


Figure 37. Menace du débit élevé d'après le %DAM mensuel maximal de mai modélisé (calculé comme le débit mensuel moyen sur l'année) pour les conditions climatiques moyennes (a) de 1981 à 2010 et de 2040 à 2060 selon (b) le profil RCP 4.5 et (c) le profil RCP 8.5. Nous avons calculé le %DAM mensuel projeté futur par rapport à la période historique (de 1981 à 2010). Les cotes de la menace du débit élevé (fondées sur les valeurs cartographiées présentées ici) ont été transformées et mises à l'échelle de 0 à 1, de sorte qu'une cote plus élevée indiquait des débits maximaux plus élevés.

En août, les températures moyennes des cours d'eau étaient les plus chaudes dans les grands cours d'eau, notamment dans le fleuve Fraser, la rivière Thompson et la rivière Nechako (figure 38a). Les températures des cours d'eau ont augmenté entre les conditions actuelles et futures, les températures chaudes dans les grandes rivières et les cours d'eau se trouvant à des altitudes faibles à moyennes (figure 38b-c).

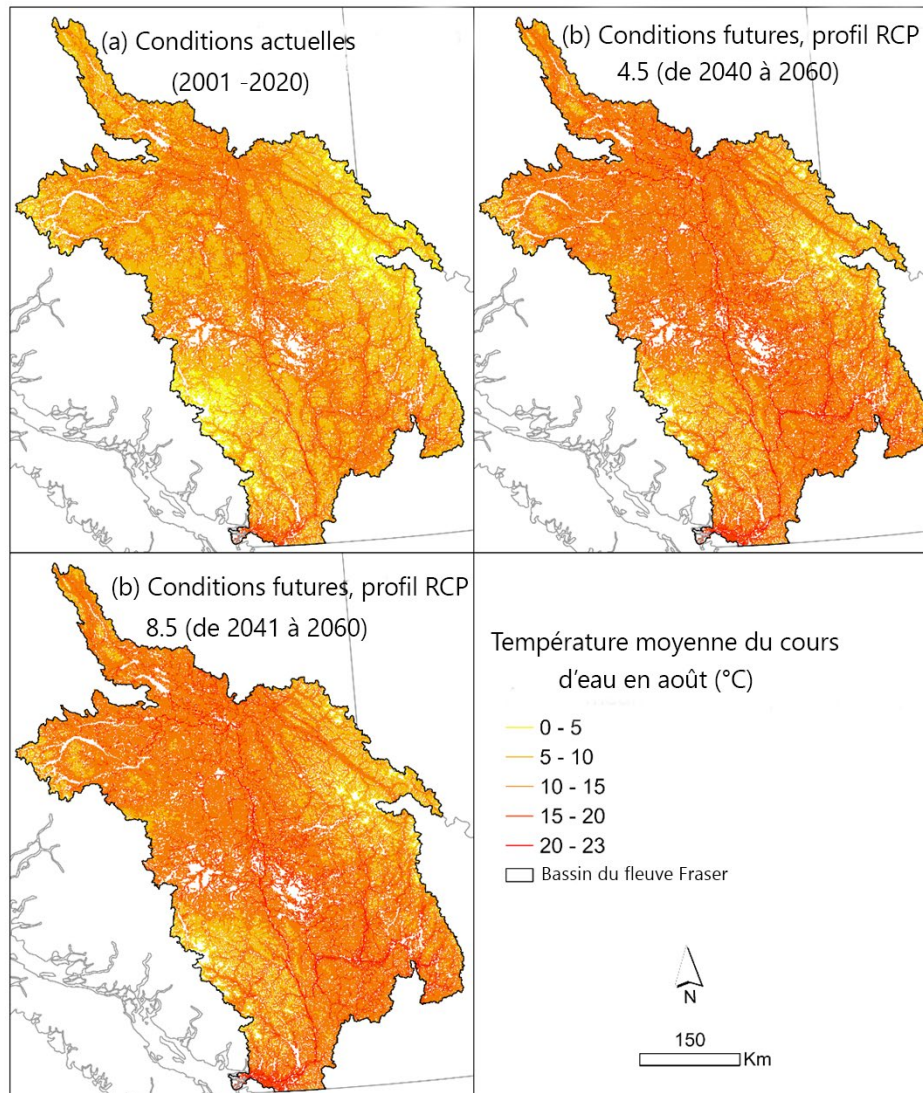


Figure 38. Menace de la température chaude des cours d'eau fondée sur la moyenne modélisée des températures des cours d'eau en août pour (a) les conditions actuelles (de 2001 à 2020) et futures (de 2041 à 2060) selon (b) le profil RCP 4.5 et (c) le profil RCP 8.5. Les cotes de la menace de la température chaude mises à l'échelle de 0 à 1 indiquent une hausse des températures.

La cote des menaces cumulatives liées aux changements climatiques était la plus élevée pour tout le fleuve Fraser et sur le plateau intérieur, et les cotes faibles étaient généralement limitées aux zones à haute altitude de la chaîne côtière et des montagnes Rocheuses (figure 39). Les cotes étaient plus élevées pour le profil RCP 8.5 que pour le profil RCP 4.5, surtout dans le sud du BFF.

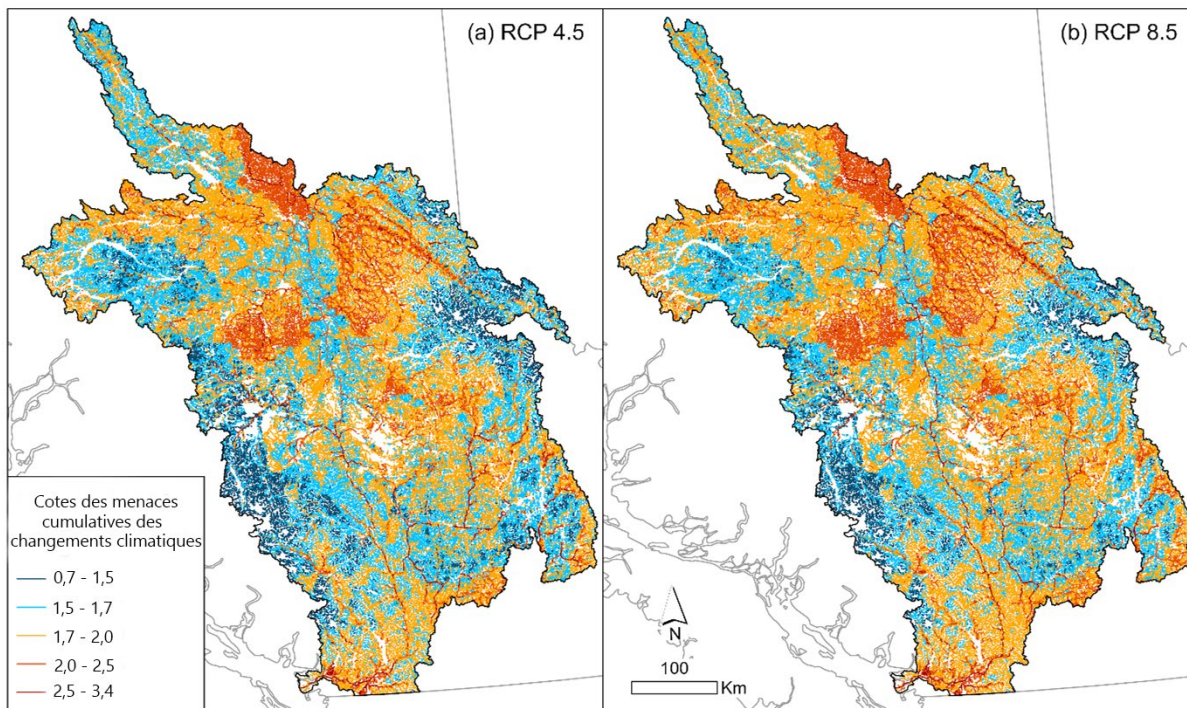


Figure 39. Cote de menace additive cumulative liée aux changements climatiques de 2040 à 2060 selon (a) le profil RCP 4.5 et (b) le profil RCP 8.5.

3.3. SOMMAIRES

Les cotes des menaces de l'activité humaine et de la perturbation du paysage variaient grandement, même si nombre d'entre elles étaient dominées par des valeurs de 0 avec les valeurs aberrantes plus élevées, en particulier pour les espèces aquatiques envahissantes, la modification du débit, la destruction de l'habitat dans les cours d'eau, la fragmentation latitudinale et la fragmentation longitudinale pour les espèces anadromes. Ces valeurs indiquent qu'une majorité des cours d'eau n'ont pas été touchés par ces menaces et qu'une petite proportion d'entre eux a été relativement très touchée (figure 40). Les menaces ayant des valeurs médianes plus élevées étaient la perturbation du milieu riverain, les éléments nutritifs, la pollution et la sédimentation. Les éléments nutritifs, la pollution et la sédimentation avaient intrinsèquement peu de valeurs de 0, car tous les types de couverture terrestre étaient considérés comme contribuant à certains intrants, même s'ils pouvaient être partiellement filtrés par des zones tampons riveraines non perturbées et dilués par des volumes de débit plus élevés. Les valeurs médianes des cotes des menaces liées aux changements climatiques étaient les plus faibles pour le risque d'inondation en raison de l'étendue limitée des niveaux d'inondation modélisés, mais celles des trois autres paramètres se situaient au milieu de la plage (figures 33, 41). La médiane du débit élevé était généralement plus élevée avec le profil RCP 8.5 qu'avec le profil RCP 4.5, et aucune différence notable entre les RCP n'a été relevée pour les cotes des autres menaces (figure 41).

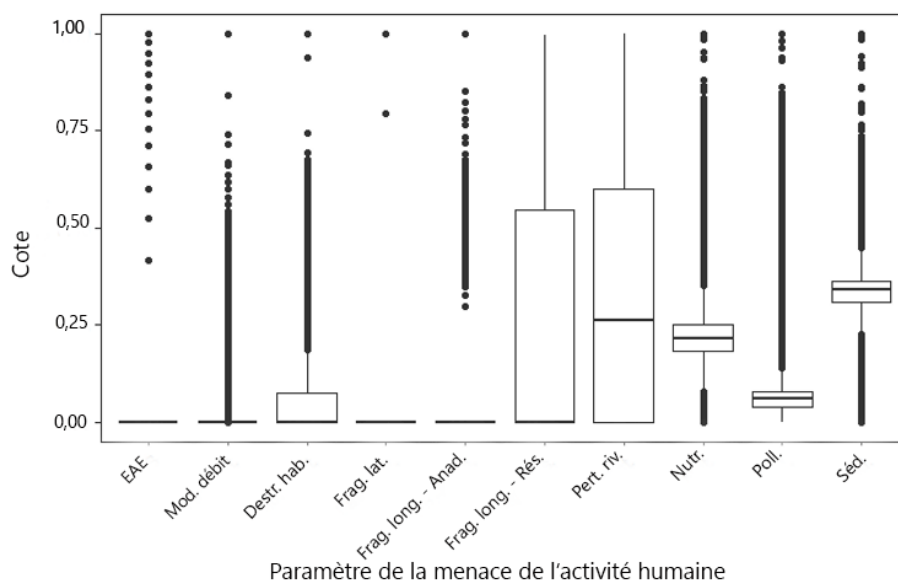


Figure 40. Diagrammes de quartiles de Tukey des menaces de l'activité humaine et de la perturbation du paysage : espèces aquatiques envahissantes (EAE), modification du débit (Mod. débit), destruction de l'habitat dans les cours d'eau (Destr. hab.), fragmentation latitudinale (Frag. lat.), fragmentation longitudinale pour les espèces anadromes (Frag. long. – anad.), fragmentation longitudinale pour les espèces résidentes (Frag. long. – rés.), perturbation du milieu riverain (Pert. riv.), éléments nutritifs (Nut.), pollution (Poll.) et sédimentation (Séd.). La ligne du diagramme représente la médiane des tronçons de cours d'eau, les charnières inférieure et supérieure représentent respectivement les 25^e et 75^e centiles, et les valeurs aberrantes sont les points au-dessus ou en dessous de 1,5 * la plage interquartile.

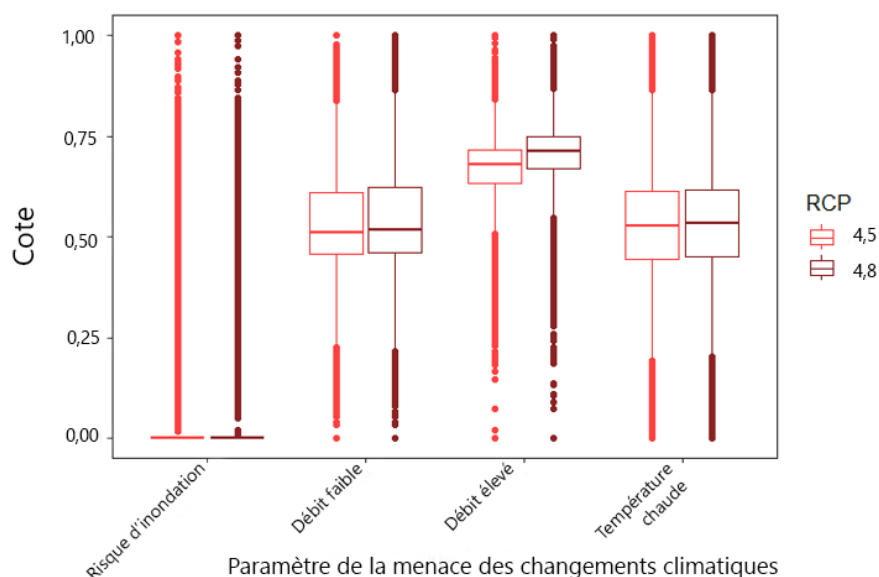


Figure 41. Diagrammes de quartiles de Tukey des cotes des menaces liées aux changements climatiques de 2040 à 2060 selon les profils RCP 4.5 et 8.5. Les cotes plus élevées indiquent une variation plus importante du niveau d'inondation absolu (« risque d'inondation »), des débits mensuels (%DAM) minimaux d'août plus faibles (« débit faible »), des débits mensuels (%DAM) maximaux de mai plus élevés (« débit élevé ») et des températures des cours d'eau plus chaudes en août (« température chaude »).

Les médianes des cotes des menaces cumulatives pour la menace de l'activité humaine et les menaces liées aux changements climatiques étaient généralement semblables entre les espèces de saumons et par rapport à tous les cours d'eau du BFF (figure 42). Toutefois, les médianes des cotes des menaces cumulatives pour la menace de l'activité humaine pour les UC de saumon chinook non en péril avaient tendance à être plus élevées que pour les autres UC et pour tous les cours d'eau du BFF, et celles des cotes des menaces cumulatives pour les menaces liées aux changements climatiques avaient tendance à être plus élevées pour les UC de saumon rouge non en péril. Parmi les différentes UC, les médianes de la cote de menace cumulative pour la menace de l'activité humaine étaient particulièrement élevées pour l'UC du saumon rouge de Cultus à montaison tardive, en voie de disparition (SEL-03-02) et de la population des lacs Momich à montaison du début de l'été, en voie de disparition (SEL-09-xx; annexe G, figure G1). L'UC menacée de saumon rouge à montaison du début de l'été de la rivière North Barrière (SEL-10-03) avait également obtenu la médiane la plus élevée de la cote de menace cumulative pour les menaces liées aux changements climatiques (annexe G, figure G2). Les médianes des cotes de menace cumulative pour la menace de l'activité humaine relative à l'étendue des espèces en péril étaient considérablement plus élevées par rapport à tous les cours d'eau pour le chabot de la chaîne côtière, l'esturgeon vert, le naseux de Nooksack et le meunier de Salish (figure 43). Les médianes des cotes des menaces cumulatives pour les menaces liées aux changements climatiques étaient plus semblables, mais elles étaient plus élevées pour les étendues du meunier de montagne et de l'esturgeon blanc, en particulier, par rapport à tous les cours d'eau (figure 43).

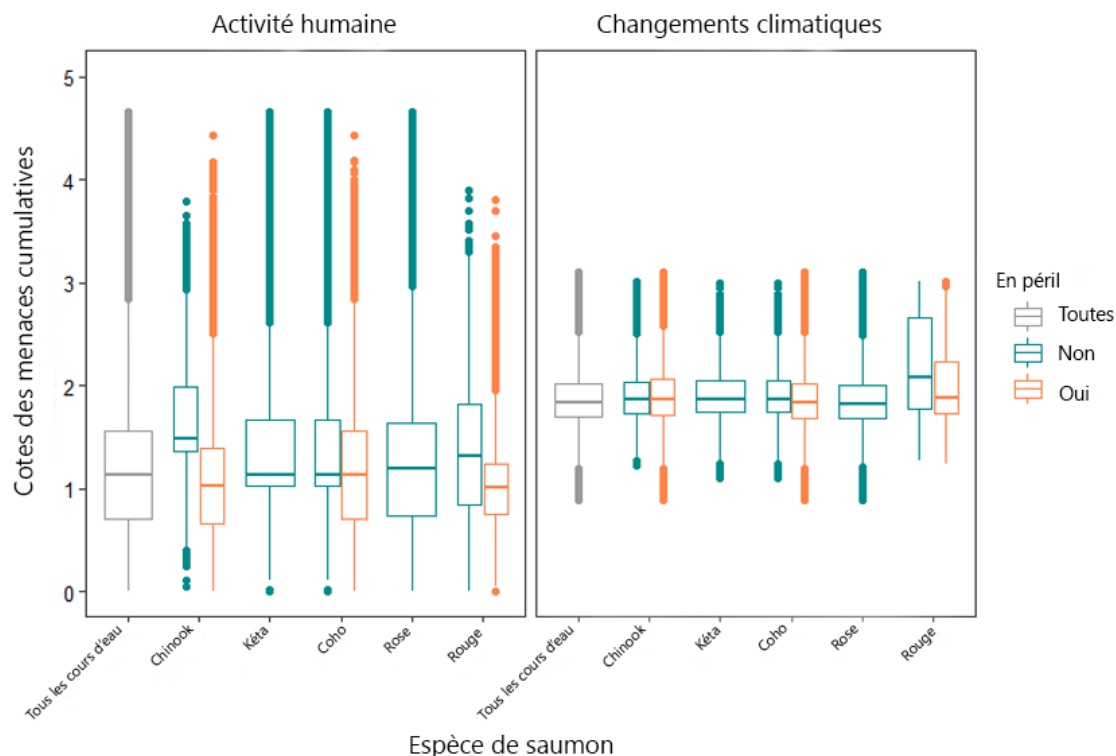


Figure 42. Diagrammes de quartiles de Tukey des cotes des menaces cumulatives pour les menaces de l'activité humaine et de la perturbation du paysage (panneau de gauche) et les menaces liées aux changements climatiques (panneau de droite) pour tous les cours d'eau du BFF et les cours d'eau situés dans les UC de saumon (en incluant uniquement les cours d'eau en aval des obstacles naturels pour le saumon). Les UC désignées comme préoccupantes, menacées ou en voie de disparition par le COSEPAC ont été différenciées des UC non en péril.

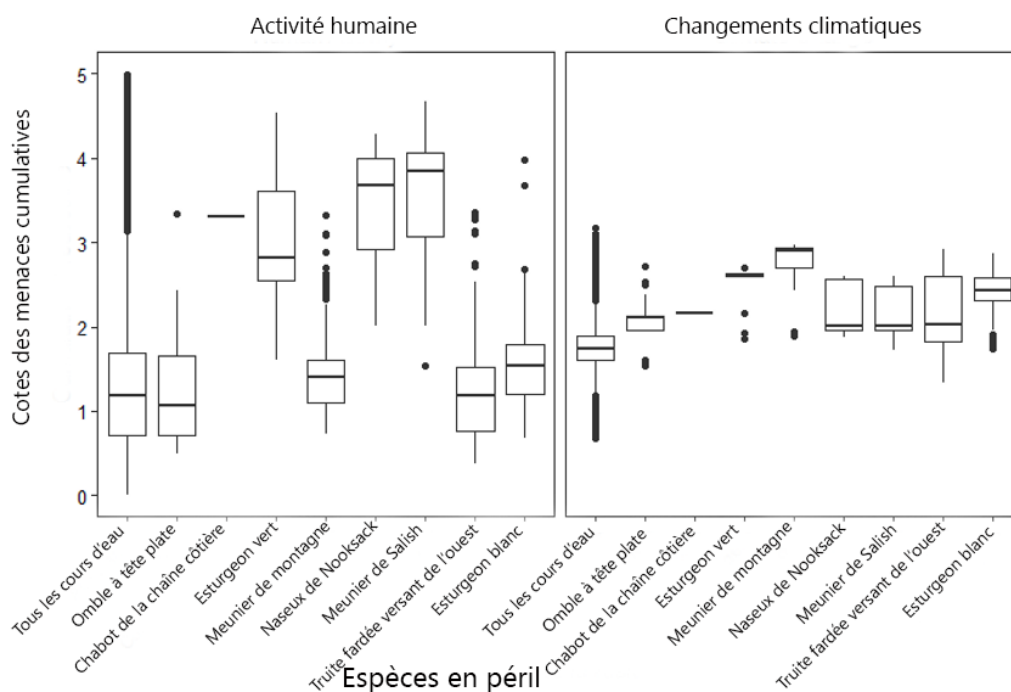


Figure 43. Diagrammes de quartiles de Tukey des cotes des menaces cumulatives pour les menaces de l'activité humaine et de la perturbation du paysage (panneau de gauche) et les menaces liées aux changements climatiques (panneau de droite) pour tous les cours d'eau du BFF et les habitats de cours d'eau délimités des espèces de poissons en péril.

Correspondant aux cotes des menaces cumulatives pour la menace de l'activité humaine, les valeurs médianes des menaces individuelles avaient tendance à être semblables pour toutes les espèces de saumons et par rapport à tous les cours d'eau du BFF (figure 44). Toutefois, les médianes des cotes de la menace de la perturbation du milieu riverain pour les UC de saumon kéta et les UC de saumon coho qui ne sont pas en péril étaient plus faibles par rapport aux autres UC et à tous les cours d'eau du BFF. De plus, les médianes des cotes de la menace de la fragmentation longitudinale pour les espèces anadromes pour les UC de saumon chinook, de saumon kéta et de saumon coho non en péril étaient plus élevées par rapport aux autres UC et à tous les cours d'eau du BFF. Les valeurs médianes pour les étendues des espèces en péril différaient le plus pour les menaces des EAE, de la fragmentation latitudinale, de la perturbation du milieu riverain, des éléments nutritifs et de la pollution (figure 45). Le chevauchement avec les cotes plus élevées des menaces des EAE, de la fragmentation latitudinale et de la perturbation du milieu riverain était le plus important pour les étendues du chabot de la chaîne côtière, de l'esturgeon vert, du naseux de Nooksack et du meunier de Salish. Les médianes des cotes de la menace de la charge en éléments nutritifs avaient tendance à être les plus élevées pour le naseux de Nooksack et le meunier de Salish, et celles des cotes de la menace de la pollution avaient tendance à être les plus élevées pour ces deux espèces, ainsi que pour l'esturgeon vert, le meunier de montagne et l'esturgeon blanc (figure 45).

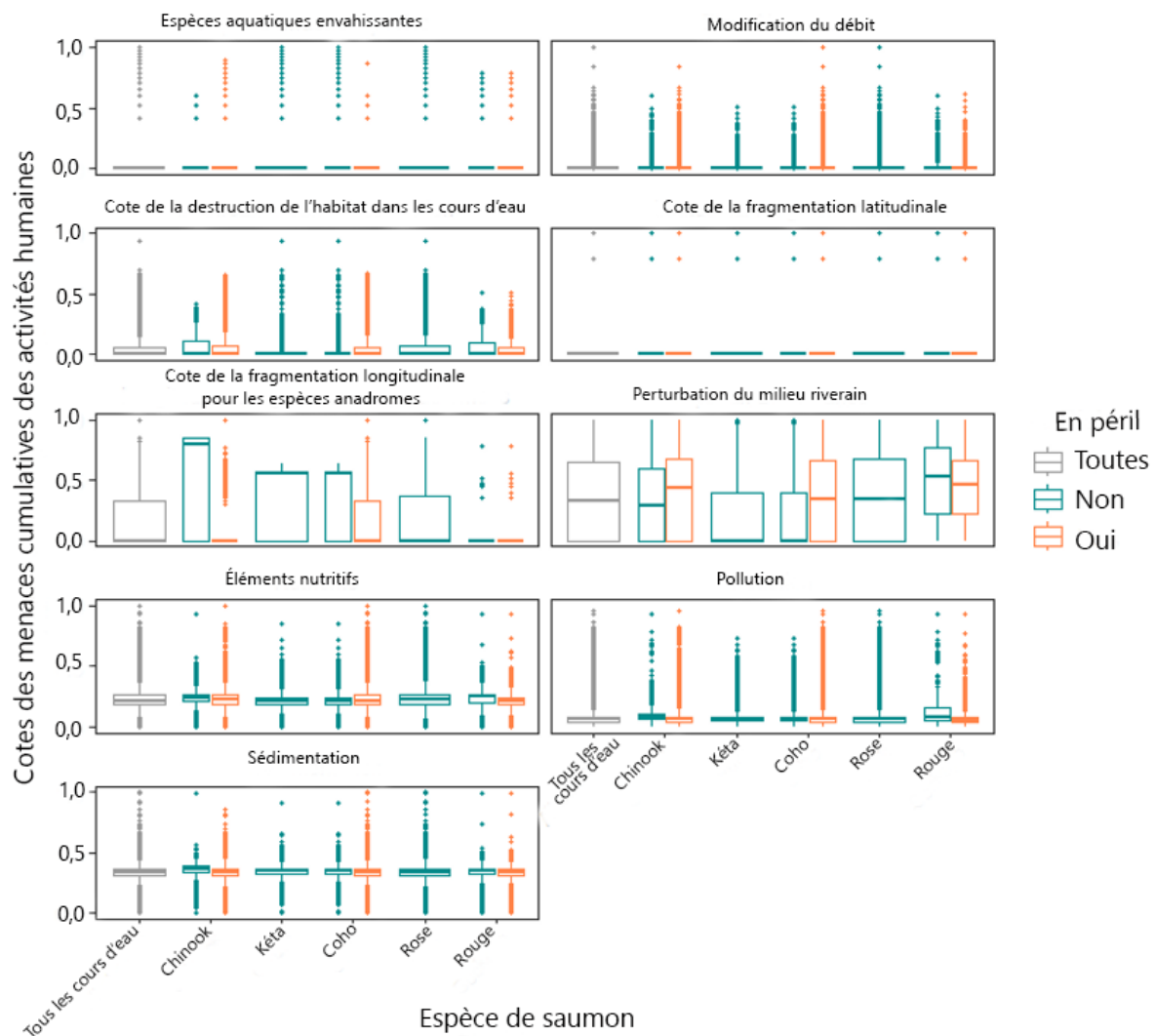


Figure 44. Diagrammes de quartiles de Tukey des menaces de l'activité humaine et de la perturbation du paysage pour tous les cours d'eau du BFF et les cours d'eau situés dans les UC de saumon (en incluant uniquement les cours d'eau en aval des obstacles naturels pour le saumon). Les UC désignées comme préoccupantes, menacées ou en voie de disparition par le COSEPAC ont été différenciées des UC non en péril (voir les résultats de chaque UC à la figure G1 de l'annexe G).

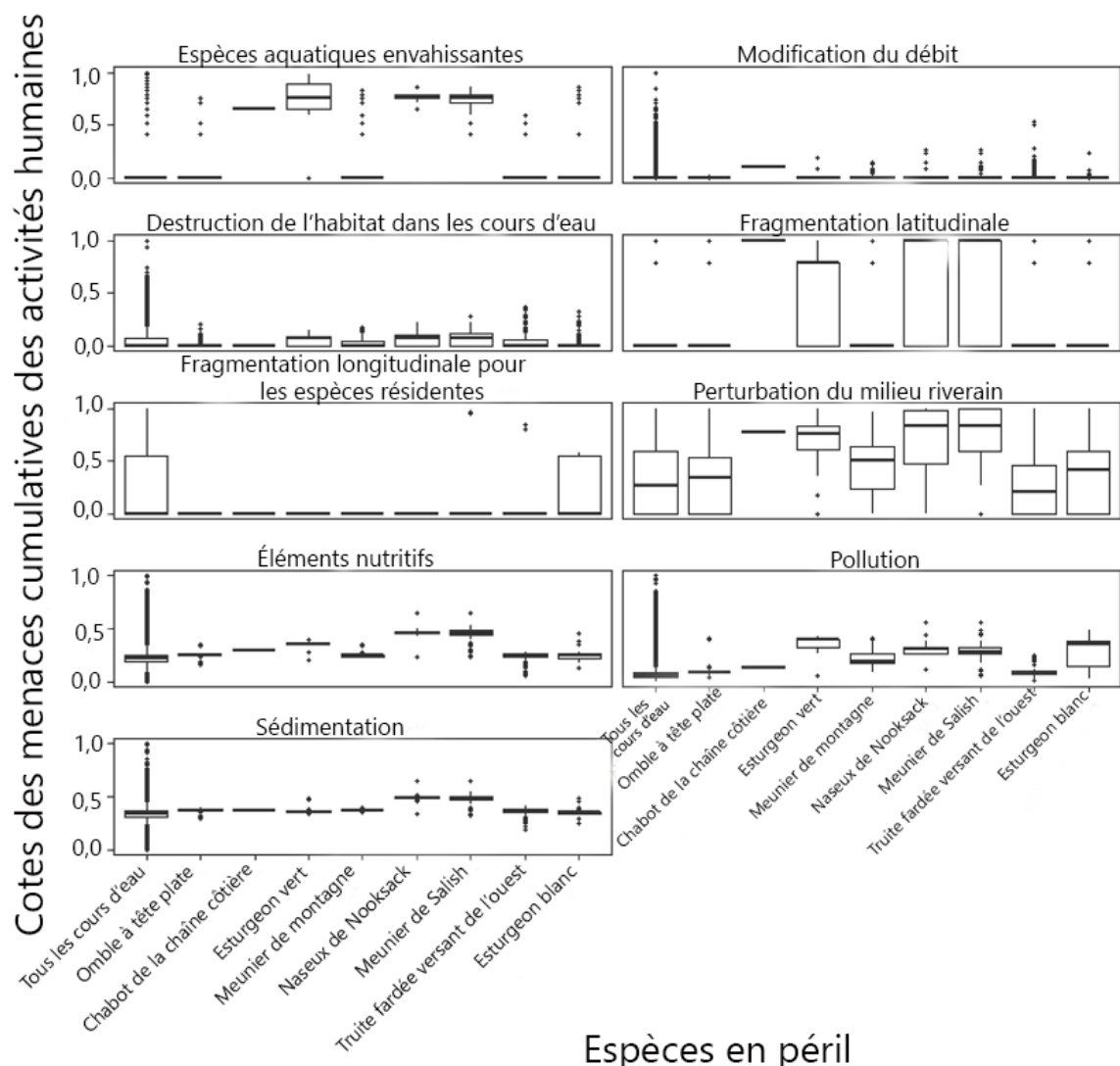


Figure 45. Diagrammes de quartiles de Tukey des menaces de l'activité humaine et de la perturbation du paysage pour tous les cours d'eau du BFF et les habitats de cours d'eau délimités des espèces de poissons en péril.

Les valeurs médianes des différentes menaces liées aux changements climatiques variaient d'une espèce de saumon à l'autre dans les UC (figure 46). Les comparaisons relatives de l'exposition de l'UC aux menaces de débit faible et élevé étaient généralement inversées, car les UC exposées à des débits minimaux faibles (c.-à-d. cote plus élevée pour la menace du débit faible) étaient moins exposées à des débits maximaux élevés (c.-à-d. cote plus élevée pour la menace du débit élevé). Les tendances les plus notables étaient les médianes plus élevées des cotes du débit faible (c.-à-d. débit minimal plus faible) pour les UC de saumon keta et les UC de saumon coho qui ne sont pas en péril, et la médiane plus élevée de la température des cours d'eau des UC de saumon rouge qui ne sont pas en péril (figure 46). La médiane de la variation des crues était la plus élevée pour le meunier de montagne, suivi de l'esturgeon vert, de l'esturgeon blanc et de l'omble à tête plate (figure 47). Les valeurs médianes des menaces du débit faible étaient les plus élevées (c.-à-d. des débits minimaux plus faibles) pour le chabot de la chaîne côtière, le naseux de Nooksack et le meunier de Salish par rapport aux autres espèces en péril et à tous les cours d'eau du BFF. Par rapport à tous les cours d'eau, les

étendues des EAE avaient tendance à être exposées de la même manière ou moins à la menace du débit élevé. Enfin, la médiane de la température des cours d'eau était considérablement plus élevée pour le chabot de la chaîne côtière, l'esturgeon vert, le meunier de montagne, le naseux de Nooksack et l'esturgeon blanc par rapport à tous les cours d'eau (figure 47).

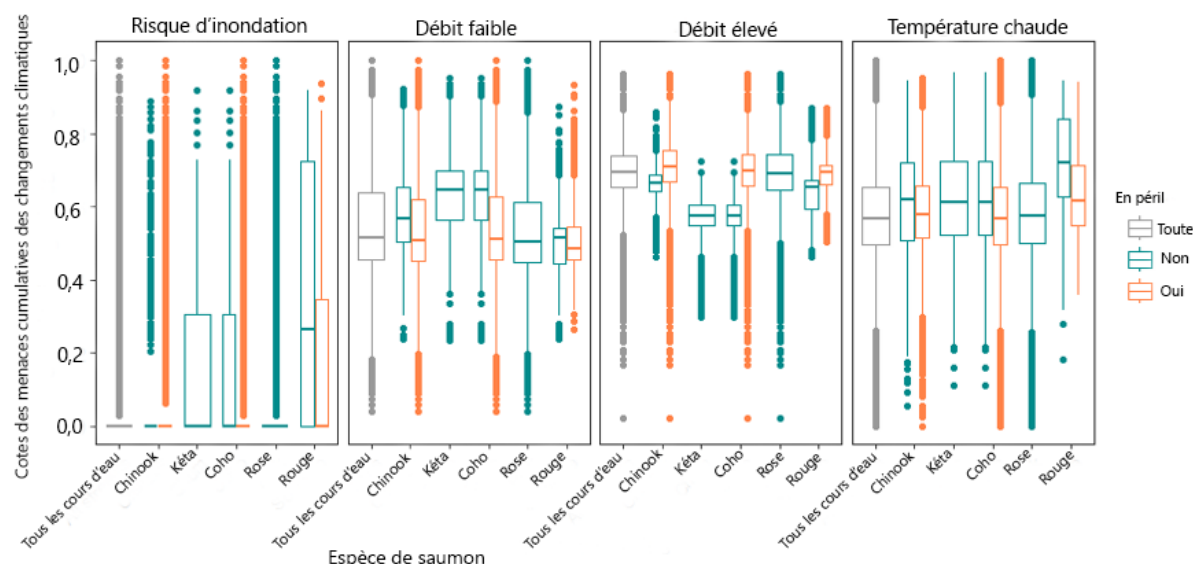


Figure 46. Diagrammes de quartiles de Tukey des menaces liées aux changements climatiques de 2040 à 2060 selon le profil RCP 4.5 pour tous les cours d'eau du bassin du fleuve Fraser et pour les cours d'eau qui se trouvent dans les UC de saumon (en incluant uniquement les cours d'eau en aval des obstacles naturels pour le saumon). Les UC désignées comme préoccupantes, menacées ou en voie de disparition par le COSEPAC ont été différenciées des UC non en péril (voir les résultats de chaque UC à la figure G2 de l'annexe G). Les cotes plus élevées indiquent une variation plus importante du niveau d'inondation absolu (« risque d'inondation »), des débits mensuels (%DAM) minimaux d'août plus faibles (« débit faible »), des débits mensuels (%DAM) maximaux de mai plus élevés (« débit élevé ») et des températures des cours d'eau plus chaudes en août (« température chaude »).

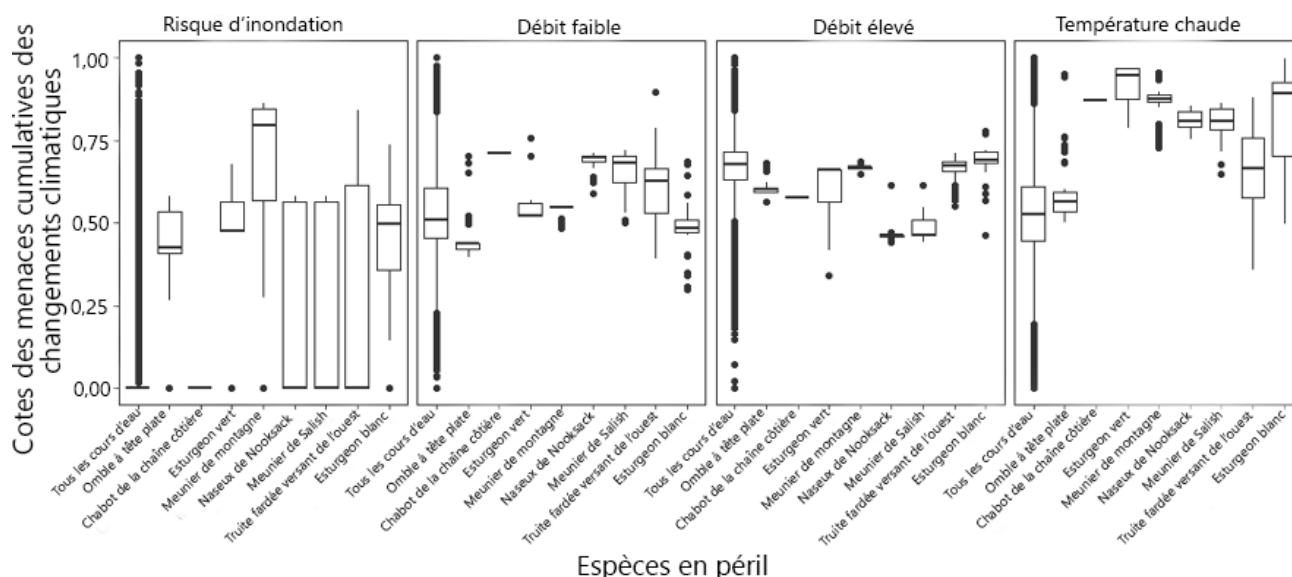


Figure 47. Diagrammes de quartiles de Tukey des menaces liées aux changements climatiques de 2040 à 2060 selon le profil RPC 4.5 pour tous les cours d'eau du bassin du fleuve Fraser et les habitats de cours d'eau délimités des espèces de poissons en péril. Les cotes plus élevées indiquent une variation plus importante du niveau d'inondation absolu (« risque d'inondation »), des débits mensuels (%DAM) minimaux d'août plus faibles (« débit faible »), des débits mensuels (%DAM) maximaux de mai plus élevés (« débit élevé ») et des températures des cours d'eau plus chaudes en août (« température chaude »).

Les médianes des cotes des menaces cumulatives pour la menace de l'activité humaine par groupes de bassins hydrographiques ont montré que le plateau intérieur et le groupe de bassins hydrographiques du bas Fraser sont les zones présentant les menaces additionnées les plus élevées (figure 48a). Les médianes les plus élevées des cotes des menaces cumulatives étaient celles de la rivière Nicola, du ruisseau Guichon et de la rivière San Jose, du premier au troisième rang parmi les bassins hydrographiques. Dans les groupes de bassins hydrographiques du BFF, les activités ou les perturbations les plus courantes qui contribuaient aux menaces, en fonction de l'occurrence définie et selon la pertinence pour chaque cote de menace, étaient les routes, suivies par les barrages et la défoliation par les ravageurs forestiers, puis par les feux de forêt (figure 48b). L'occurrence d'une activité ou d'une perturbation, comme définie pour chaque menace, était fondée sur sa présence dans une zone d'intérêt pour un tronçon de cours d'eau pour les menaces localisées (p. ex. modification du débit, perturbation du milieu riverain, destruction de l'habitat dans le cours d'eau), sa présence en amont d'un cours d'eau focal pour les menaces accumulées par le débit (p. ex. sédimentation, nutriments, pollution) ou sa présence en aval d'un cours d'eau focal pour la fragmentation longitudinale pour les espèces anadromes.

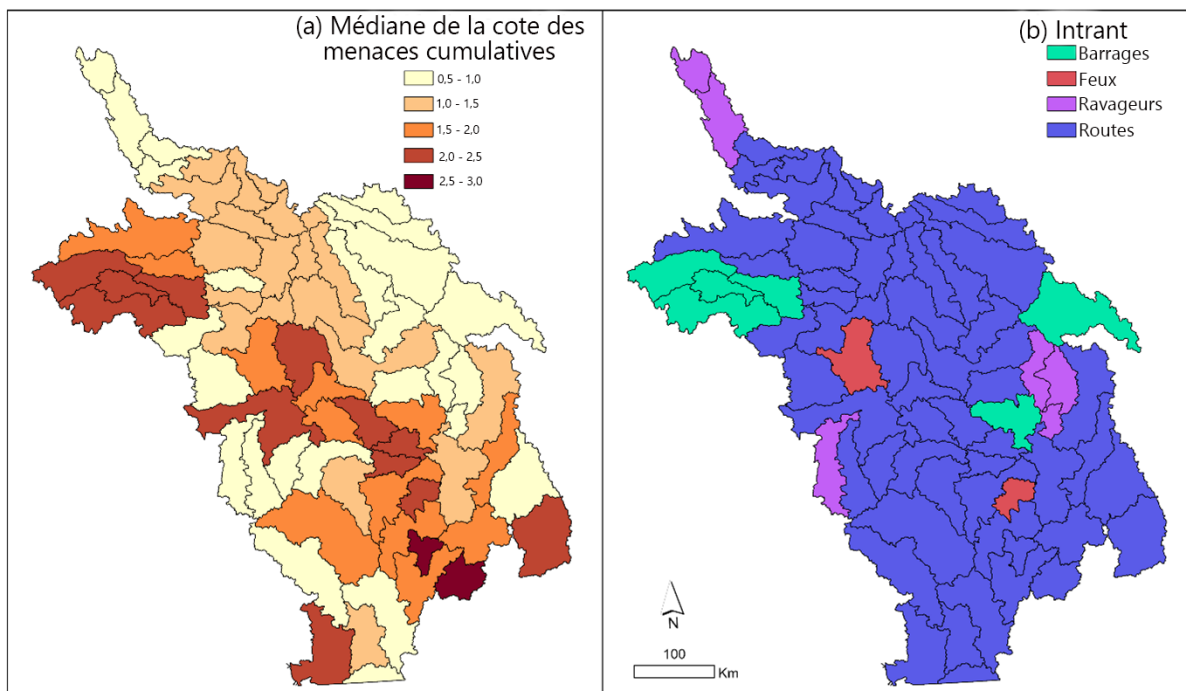


Figure 48. Résumé des résultats pour les groupes de bassins hydrographiques, indiquant (a) la médiane de la cote des menaces cumulatives pour les menaces de l'activité humaine et de la perturbation du paysage et (b) l'activité ou la perturbation la plus répandue contribuant aux menaces dans l'ensemble des cours d'eau, en fonction de leur occurrence en amont, en aval ou dans une zone d'intérêt d'un cours d'eau, selon leur pertinence pour chaque cote de menace.

La proportion de la contribution des intrants pour les menaces comportant plusieurs sources d'activité humaine et de perturbation du paysage a indiqué ceux qui contribuaient le plus à l'intérieur des groupes de bassins hydrographiques (figure 49). Les ponceaux, les parcours naturels et les routes prédominaient pour les cotes de la destruction de l'habitat dans les cours d'eau, et les feux de forêt, la défoliation par les ravageurs forestiers, les parcours naturels et les routes étaient les plus importants pour composer les cotes de la perturbation du milieu riverain (figures 49a, b). Les feux et les routes étaient les principaux facteurs contribuant aux cotes des menaces des éléments nutritifs et de la sédimentation; la défoliation par les ravageurs forestiers était également importante pour les éléments nutritifs, et la foresterie pour la sédimentation (figures 49c, e). L'agriculture et l'utilisation des terres en milieu urbain contribuaient souvent davantage aux cotes de la menace de la pollution, mais de multiples autres intrants avaient également une influence selon le groupe de bassins hydrographiques (figure 49d). La catégorie de classe de terres « autres que les zones urbaines » représentait la majeure partie de la contribution moyenne aux menaces accumulées par le débit, en particulier la pollution, malgré un faible coefficient de concentration attribuable à la prévalence élevée de cette catégorie dans les cours d'eau (figures 49c à e).

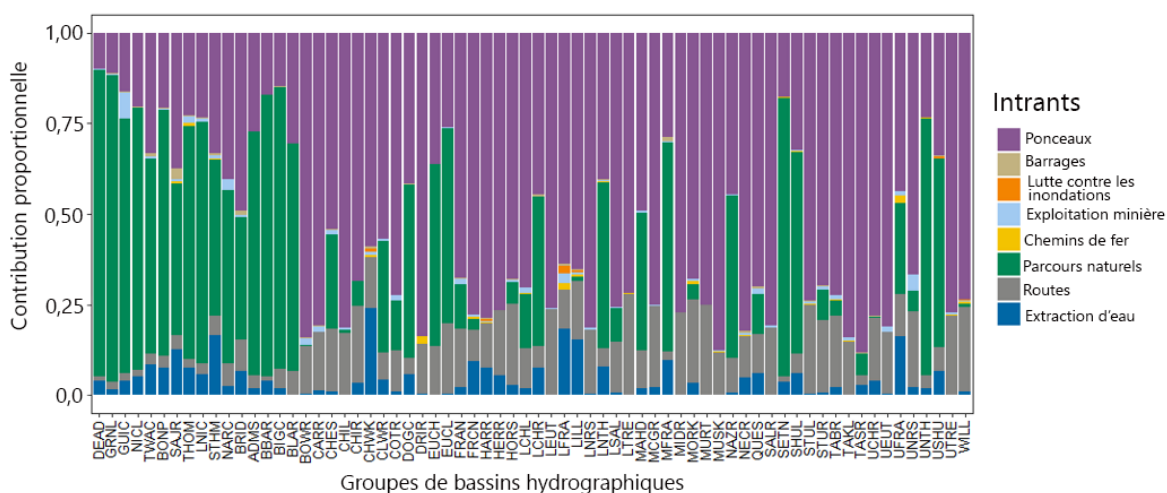


Figure 49a. Proportions moyennes des intrants de l'activité humaine et de la perturbation du paysage entre les cours d'eau des groupes de bassins hydrographiques pour la destruction de l'habitat dans les cours d'eau. Les groupes de bassins hydrographiques sont classés selon la valeur médiane de la menace, de la plus élevée à la plus faible, puis par ordre alphabétique au besoin. Voir les abréviations des groupes de bassins hydrographiques (« codes ») dans le tableau A1 à l'annexe A.

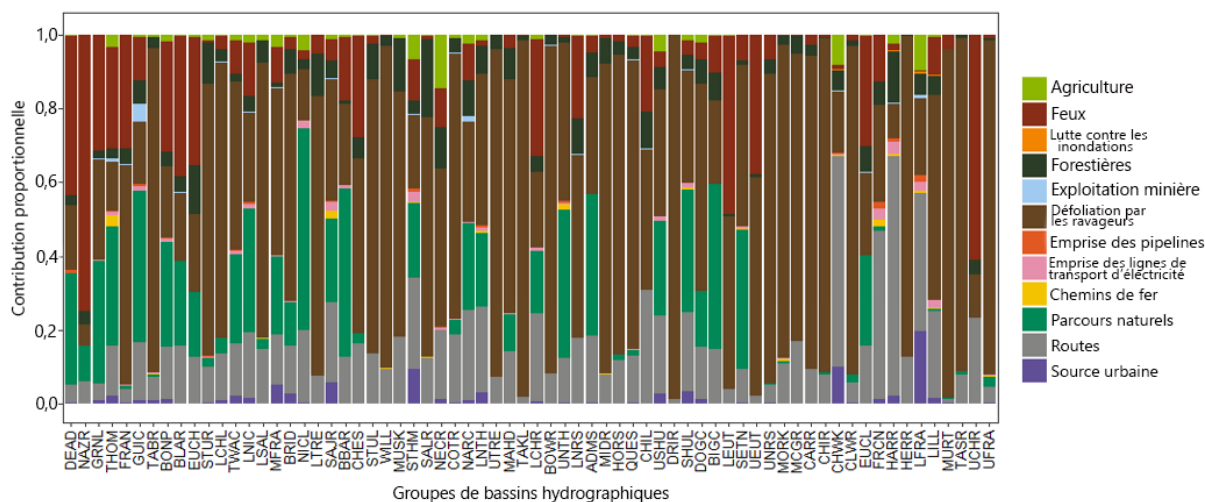


Figure 49b. Proportions moyennes des intrants de l'activité humaine et de la perturbation du paysage entre les cours d'eau des groupes de bassins hydrographiques pour la perturbation du milieu riverain. Les groupes de bassins hydrographiques sont classés selon la valeur médiane de la menace, de la plus élevée à la plus faible, puis par ordre alphabétique au besoin. Voir les abréviations des groupes de bassins hydrographiques (« codes ») dans le tableau A1 à l'annexe A.

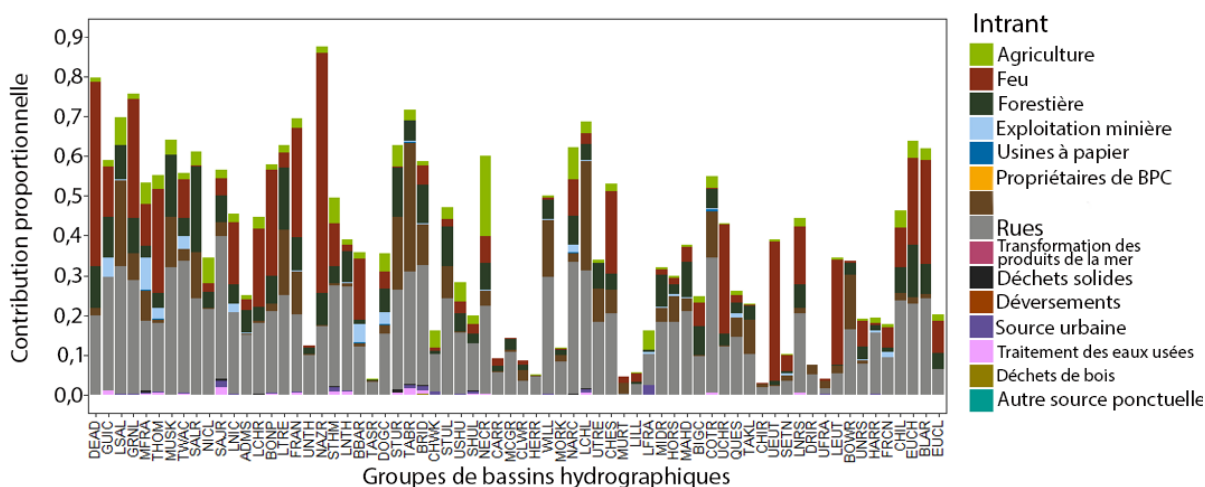


Figure 49c. Proportions moyennes des intrants de l'activité humaine et de la perturbation du paysage entre les cours d'eau des groupes de bassins hydrographiques pour la charge en éléments nutritifs. Les groupes de bassins hydrographiques sont classés selon la valeur médiane de la menace, de la plus élevée à la plus faible, puis par ordre alphabétique au besoin. La classe d'utilisation des terres « autres non urbaines » a été exclue pour visualiser d'autres intrants, mais représente le reste des contributions. Voir les abréviations des groupes de bassins hydrographiques (« codes ») dans le tableau A1 à l'annexe A.

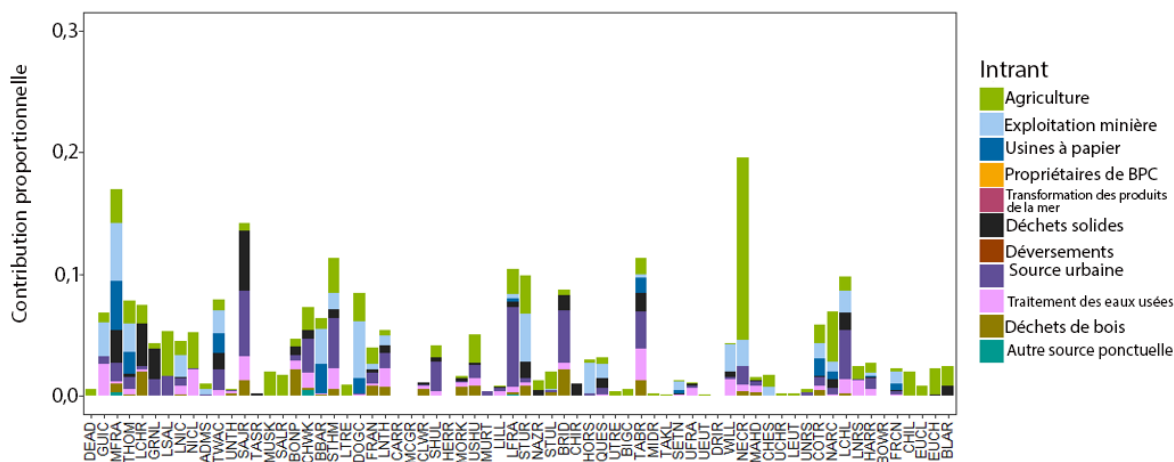


Figure 49d. Proportions moyennes des intrants de l'activité humaine et de la perturbation du paysage entre les cours d'eau des groupes de bassins hydrographiques pour la charge en pollution. Les groupes de bassins hydrographiques sont classés selon la valeur médiane de la menace, de la plus élevée à la plus faible, puis par ordre alphabétique au besoin. La classe d'utilisation des terres « autres non urbaines » a été exclue pour visualiser d'autres intrants, mais représente le reste des contributions. Voir les abréviations des groupes de bassins hydrographiques (« codes ») dans le tableau A1 à l'annexe A.

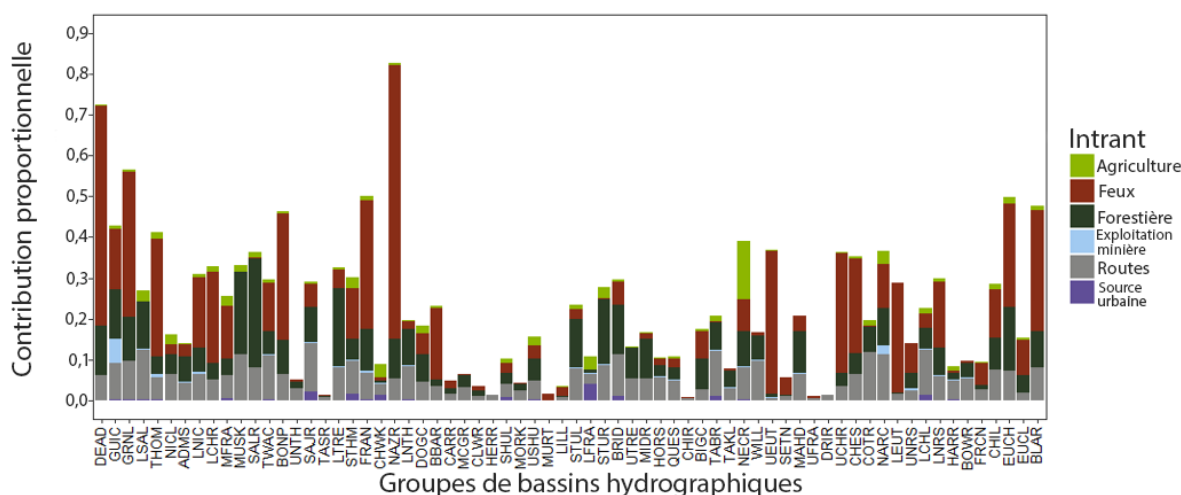


Figure 49e. Proportions moyennes des intrants de l'activité humaine et de la perturbation du paysage entre les cours d'eau des groupes de bassins hydrographiques pour la charge en sédimentation. Les groupes de bassins hydrographiques sont classés selon la valeur médiane de la menace, de la plus élevée à la plus faible, puis par ordre alphabétique au besoin. La classe d'utilisation des terres « autres non urbaines » a été exclue pour visualiser d'autres intrants, mais représente le reste des contributions. Voir les abréviations des groupes de bassins hydrographiques (« codes ») dans le tableau A1 à l'annexe A.

3.4. ÉVALUATION TEMPORELLE

Une comparaison de la couverture terrestre et de l'utilisation des terres de 2018 à 2022 a révélé des décalages importants entre les zones indiquées comme des arbres et des parcours naturels dans l'ensemble du BFF (figure 50). Par exemple, de grandes parcelles à l'intérieur et autour du bassin hydrographique principal de la rivière Thompson ont passé des arbres à des parcours naturels, mais on a constaté des évolutions des parcours naturels vers les arbres à l'intérieur du bassin hydrographique de la rivière Nechako (figures 50c et d). Les activités et les perturbations liées à la forêt se sont toutes produites sur le plateau intérieur (figures 51 à 53). Les périmètres des feux de 2008 à 2022 ont changé entre 2012 et 2022 (c.-à-d. après 2018), principalement dans le bassin hydrographique principal de la rivière Thompson et aux alentours (figure 51). L'étendue des blocs de coupe forestière a changé aléatoirement entre les deux périodes de 10 ans (figure 52). De nouvelles occurrences de défoliation grave par les ravageurs forestiers au cours de la période de 2012 à 2022 (c.-à-d. après 2018) ont eu lieu principalement autour du plateau central intérieur et du bassin hydrographique principal de la rivière Stuart; dans le bassin hydrographique principal de la rivière Thompson, elle s'est surtout produite avant 2012 (figure 53).

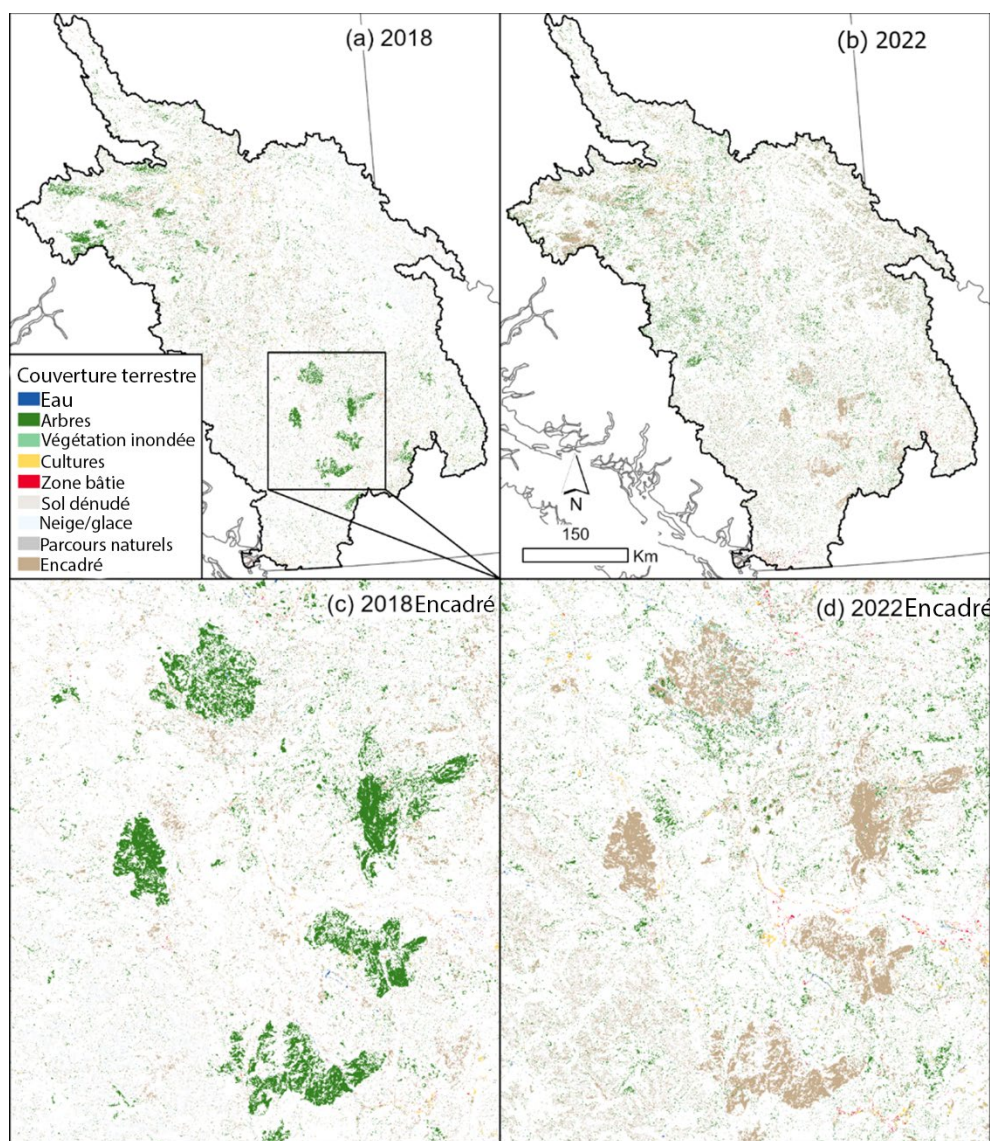


Figure 50. Changements temporels de la couverture terrestre et de l'utilisation des terres (a) de 2018 à (b) 2022, montrant les cellules de grille dont le type de couverture terrestre a changé entre les années et une vue agrandie de l'étendue mettant en évidence les changements (c) de 2018 à (d) 2022.

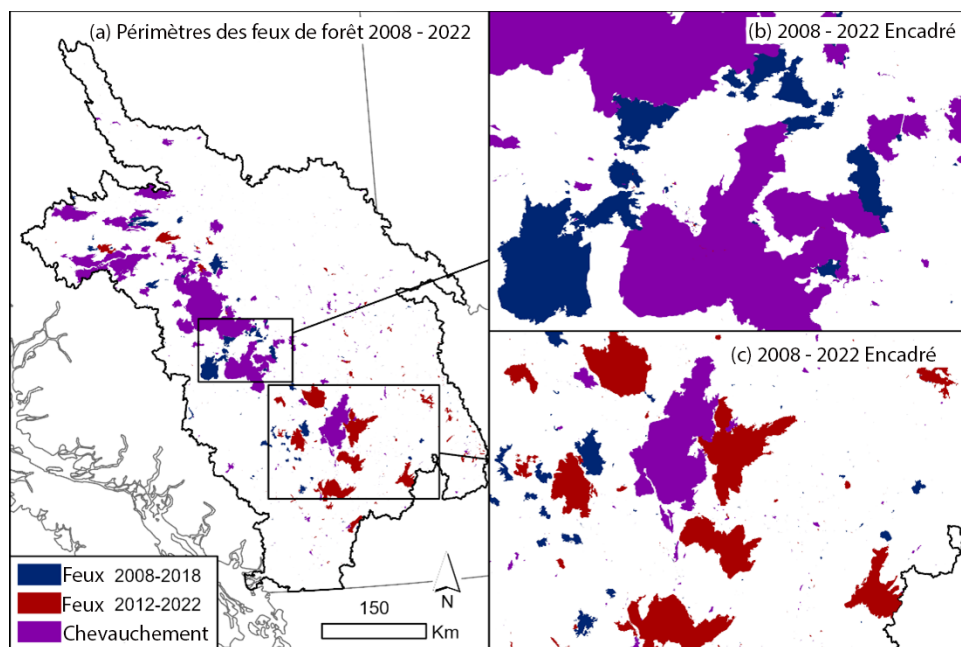


Figure 51. Changements temporels dans les périmètres des feux de forêt par périodes de 10 ans. Les périmètres de feux de forêt sont représentés pour (a) le BFF de 2008 à 2018 et de 2012 à 2022 avec les zones de chevauchement indiquées et (b-c) deux vues agrandies mettant en évidence le changement.

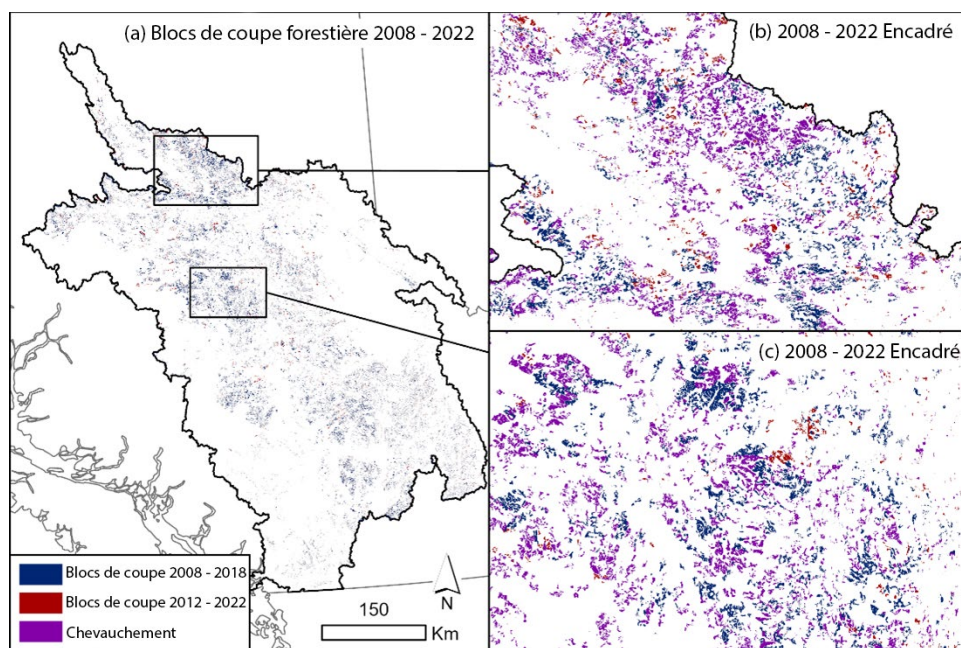


Figure 52. Changements temporels dans les blocs de coupe forestière par périodes de 10 ans. Les zones des blocs de coupe forestière sont représentées pour (a) le BFF de 2008 à 2018 et de 2012 à 2022 avec les zones de chevauchement indiquées et (b-c) deux vues agrandies mettant en évidence le changement.

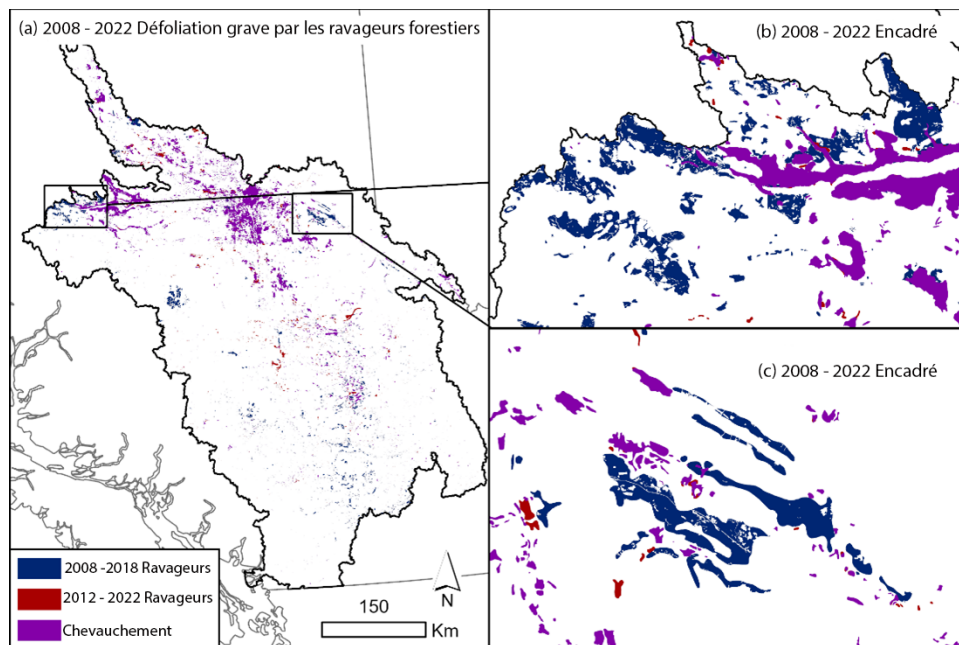


Figure 53. Changements temporels dans la défoliation grave par les ravageurs forestiers par périodes de 10 ans. Les zones où la défoliation par les ravageurs forestiers est grave sont indiquées pour (a) le BFF de 2008 à 2018 et de 2012 à 2022 avec les zones de chevauchement indiquées et (b-c) deux vues agrandies mettant en évidence le changement.

3.5. UHE DE THOMPSON-NICOLA

L'UHE de Thompson-Nicola compte 8 UC de saumon chinook (dont 5 désignées comme en voie de disparition par le COSEPAC), 3 UC de saumon coho (toutes menacées), 1 UC de saumon rose (non en péril) et 5 UC de saumon rouge (dont 1 espèce préoccupante, 1 espèce menacée et 1 espèce en voie de disparition; à noter que la population des lacs Momich à montaison du début de l'été, en voie de disparition, est considérée ici comme une UC dans un souci de simplicité; figure 54).

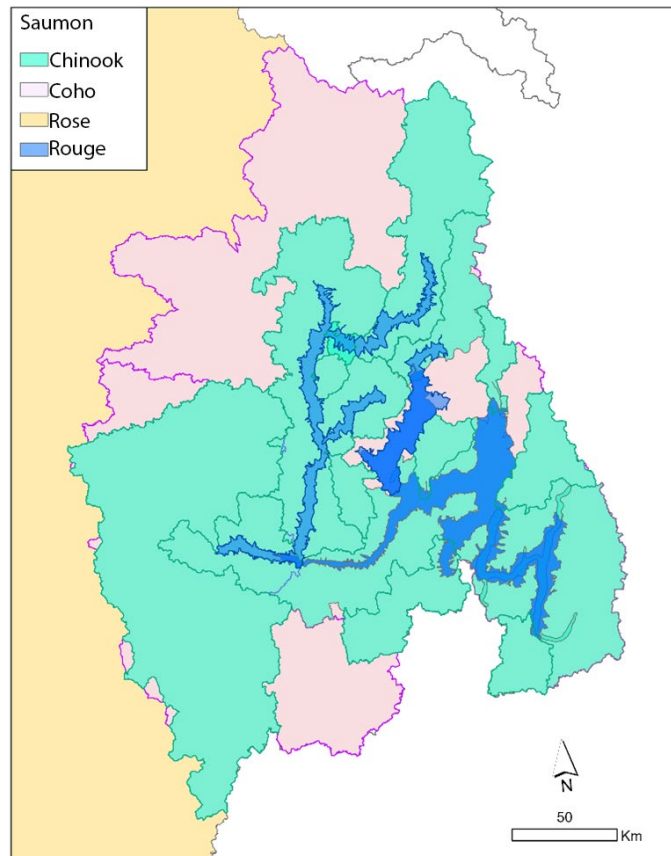


Figure 54. UC de saumon du Pacifique dans l'UHE de Thompson-Nicola et celles qui sont désignées comme préoccupantes, menacées ou en voie de disparition par le COSEPAC (à noter que l'UC du saumon rose couvre l'étendue de l'UHE).

Les médianes des cotes des menaces cumulatives pour la menace de l'activité humaine, la menace de la perturbation du paysage et les menaces liées aux changements climatiques étaient généralement semblables entre les espèces de saumons de l'UHE de Thompson-Nicola. Toutefois, la médiane des menaces cumulatives de l'activité humaine avait tendance à être la plus élevée pour les UC de saumon chinook et de saumon rouge qui ne sont pas en péril, et la menace cumulative des changements climatiques tendait à être la plus élevée pour les UC de saumon rouge (figure 55). Entre les différentes UC, les médianes des cotes de l'UC de saumon chinook, en voie de disparition, et de l'UC de saumon coho, menacée, de la basse Thompson (CK-17 et CO-07, respectivement) avaient tendance à être plus élevées pour la destruction de l'habitat dans les cours d'eau et la perturbation du milieu riverain (figure 56). Les médianes des cotes de l'UC de saumon rouge de la rivière North Barriere à montaison du début de l'été (SEL-10-03), menacée, étaient relativement élevées pour chacune des menaces liées aux changements climatiques (figure 57).

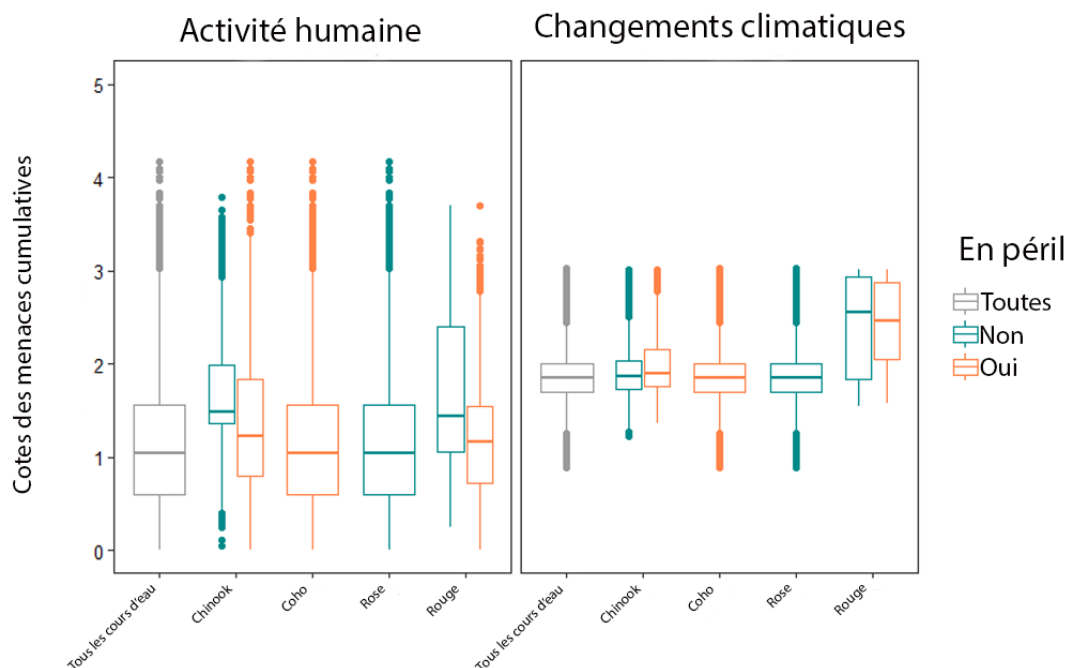


Figure 55. Diagrammes de quartiles de Tukey des cotes des menaces cumulatives pour les menaces de l'activité humaine et de la perturbation du paysage (panneau de gauche) et les menaces liées aux changements climatiques (panneau de droite) pour tous les cours d'eau de l'UHE de Thompson-Nicola et les cours d'eau situés dans les UC de saumon de l'UHE (en incluant uniquement les cours d'eau en aval des obstacles naturels pour le saumon). Les UC désignées comme préoccupantes, menacées ou en voie de disparition par le COSEPAC ont été différenciées des UC non en péril.

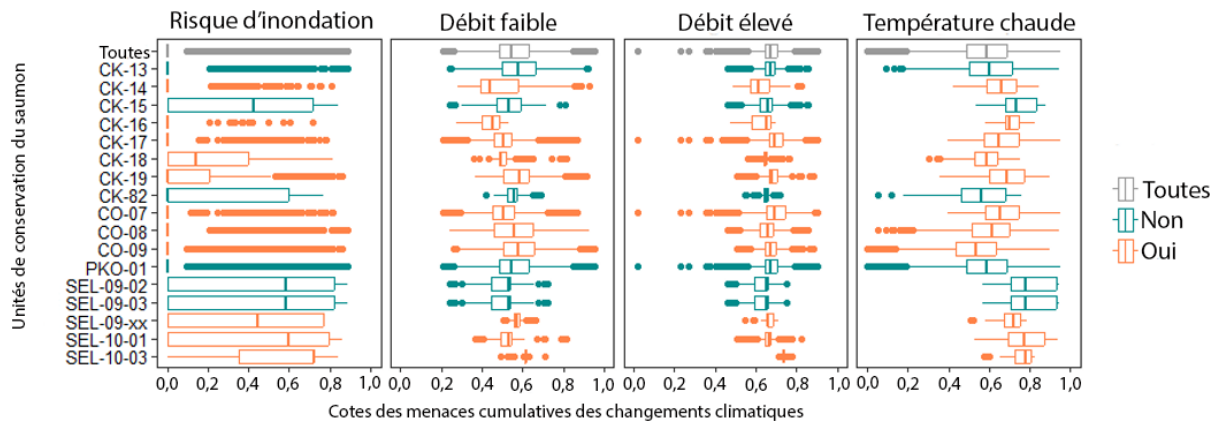


Figure 57. Diagrammes de quartiles de Tukey des cotes des menaces cumulatives et des paramètres des composantes pour les menaces liées aux changements climatiques de 2040 à 2060 selon le profil RCP 4.5 pour tous les cours d'eau de l'UHE de Thompson-Nicola et pour les cours d'eau qui se trouvent dans les UC de saumon (en incluant uniquement les cours d'eau en aval des obstacles naturels pour le saumon). Les cotes plus élevées indiquent une variation prévue plus importante du niveau d'inondation absolu (« risque d'inondation »), des débits mensuels (%DAM) minimaux d'août plus faibles (« débit faible »), des débits mensuels (%DAM) maximaux de mai plus élevés (« débit élevé ») et des températures des cours d'eau plus chaudes en août (« température chaude »). Les UC désignées comme préoccupantes, menacées ou en voie de disparition par le COSEPAC ont été différenciées des UC non en péril. Les UC étaient des UC de saumon chinook (CK), de saumon coho (CO), de saumon rose –années impaires (ROI) et de saumon rouge – lacustre (SEL).

Les médianes des cotes des menaces cumulatives combinées dans les groupes de bassins hydrographiques fondées sur la valeur multiplicative des menaces cumulatives de l'activité humaine et de l'habitat de fraie favorable dans les conditions actuelles et futures indiquaient des cotes globales plus élevées pour le saumon rouge (figure 58). Les différences relatives dans les cotes entre les espèces et les périodes à l'intérieur des bassins hydrographiques illustrent une favorabilité prévue plus grande ou plus faible pour la fraie, car les cotes des menaces cumulatives sont les mêmes pour ces comparaisons; les différences entre les bassins hydrographiques découlent d'une combinaison de différences entre les menaces cumulatives et la favorabilité pour la fraie. Une probabilité plus élevée de favorabilité environnementale pour la fraie peut ou non chevaucher les étendues actuelles des UC, car ces modèles font correspondre les conditions environnementales des tronçons de cours d'eau avec les conditions où la fraie a été observée, mais n'incluent pas d'autres facteurs limitatifs qui peuvent déterminer les contraintes de répartition. De plus, les projections du modèle comprenaient les cours d'eau actuellement inaccessibles pour guider une solution potentielle aux obstacles. Les groupes de bassins hydrographiques considérés comme inaccessibles selon les cours d'eau du 4^e ordre étaient le ruisseau Bridge, le lac Green et le lac Murtle (figure 58). Si l'on tient compte de tous les cours d'eau, les plus grands changements dans les médianes des cotes composites des conditions climatiques actuelles aux conditions climatiques futures (c.-à-d. fondées sur les changements dans la favorabilité pour la fraie), en mettant l'accent sur les groupes de bassins hydrographiques qui sont actuellement accessibles, étaient les augmentations dans le cours supérieur de la rivière North Thompson pour le saumon chinook (variation de la médiane de la cote = 0,14), dans la rivière Bonaparte pour le saumon rose (0,06) et dans la rivière Deadman pour le saumon rouge (0,11), et une diminution dans la rivière Thompson pour le saumon coho (-0,06). Les groupes de bassins hydrographiques ayant les médianes de cotes les plus élevées sont généralement demeurés les mêmes en passant des conditions actuelles aux conditions futures. Les groupes de bassins hydrographiques de la rivière Adams et de la rivière Deadman

(figure 58) étaient ceux qui avaient constamment des cotes composites élevées dans les conditions actuelles et futures du saumon (y compris tous les cours d'eau; figure 58).

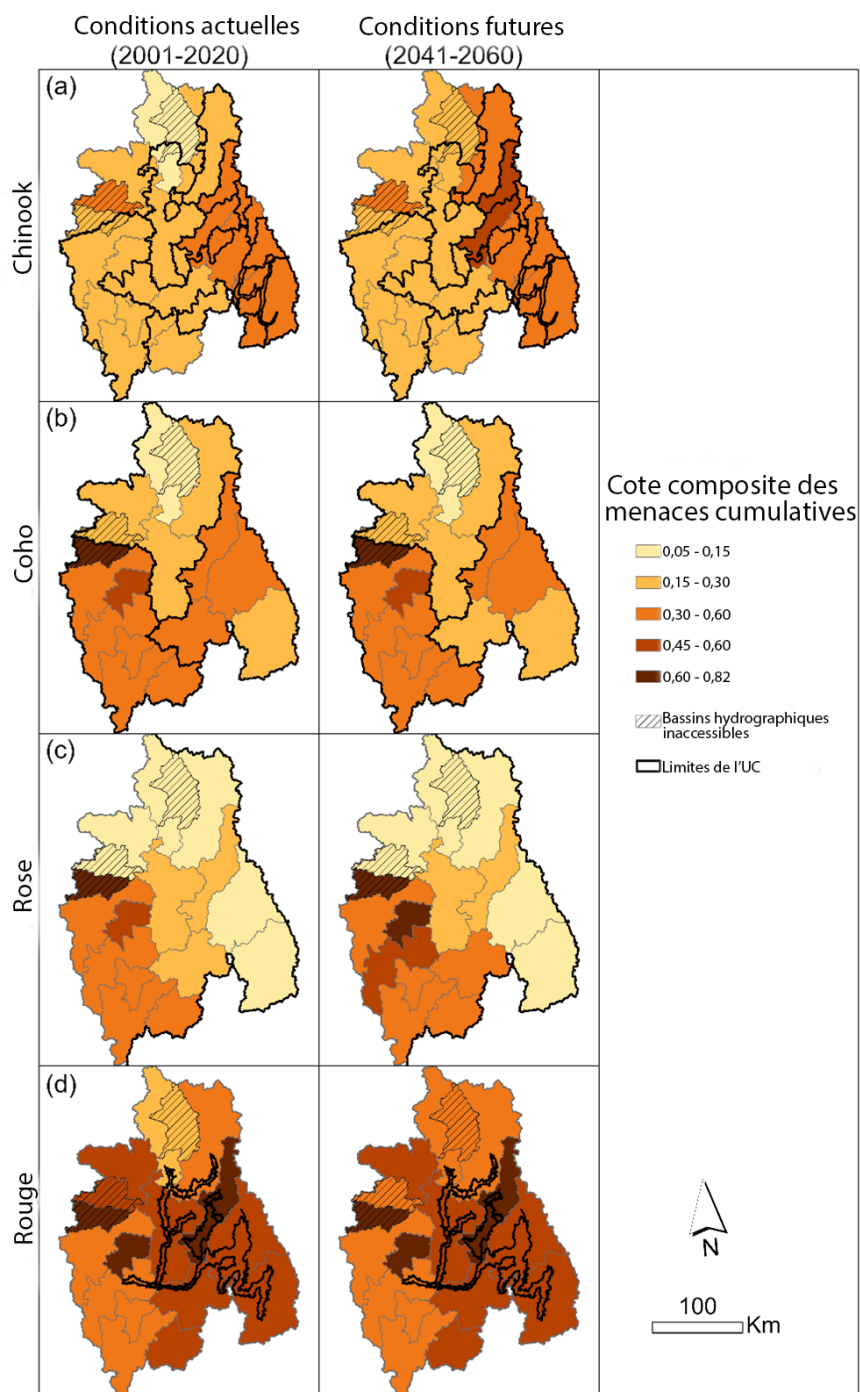


Figure 58. Médianes des cotes composites des menaces cumulatives pour les groupes de bassins hydrographiques dans l'UHE de Thompson-Nicola d'après la valeur multiplicative des menaces cumulatives de l'activité humaine et de la perturbation du paysage et la favorabilité environnementale modélisée pour la fraie : (rangée a) saumon chinook, (b) saumon coho, (c) saumon rose et (d) saumon rouge. Les probabilités de favorabilité environnementale modélisée utilisées dans la cote composite reposaient sur les conditions projetées (colonne a) actuelles et (b) futures pour tous les tronçons de cours d'eau (de 4e ordre ou plus), y compris les cours d'eau inaccessibles en raison de barrages et d'obstacles naturels. Les groupes de bassins hydrographiques qui sont en grande partie inaccessibles sont marqués par des lignes hachurées et les limites des UC de saumon sont tracées en noir.

La cote composite des intrants riverains indiquait où les intrants estimés élevés d'éléments nutritifs, de pollution et de sédimentation provenant de sources diffuses, d'après l'utilisation des terres et la perturbation du milieu riverain, correspondaient à une grande favorabilité environnementale prévue pour la fraie du saumon (figure 59). On a estimé que les intrants de sources diffuses étaient les plus élevés le long de la limite est de l'UHE de Thompson-Nicola (figure 59a). Les cotes composites des intrants riverains étaient les plus élevées le long des rivières North Thompson, Eagle et Shuswap, en particulier pour le saumon chinook, le saumon coho et le saumon rouge (figure 59b à e).

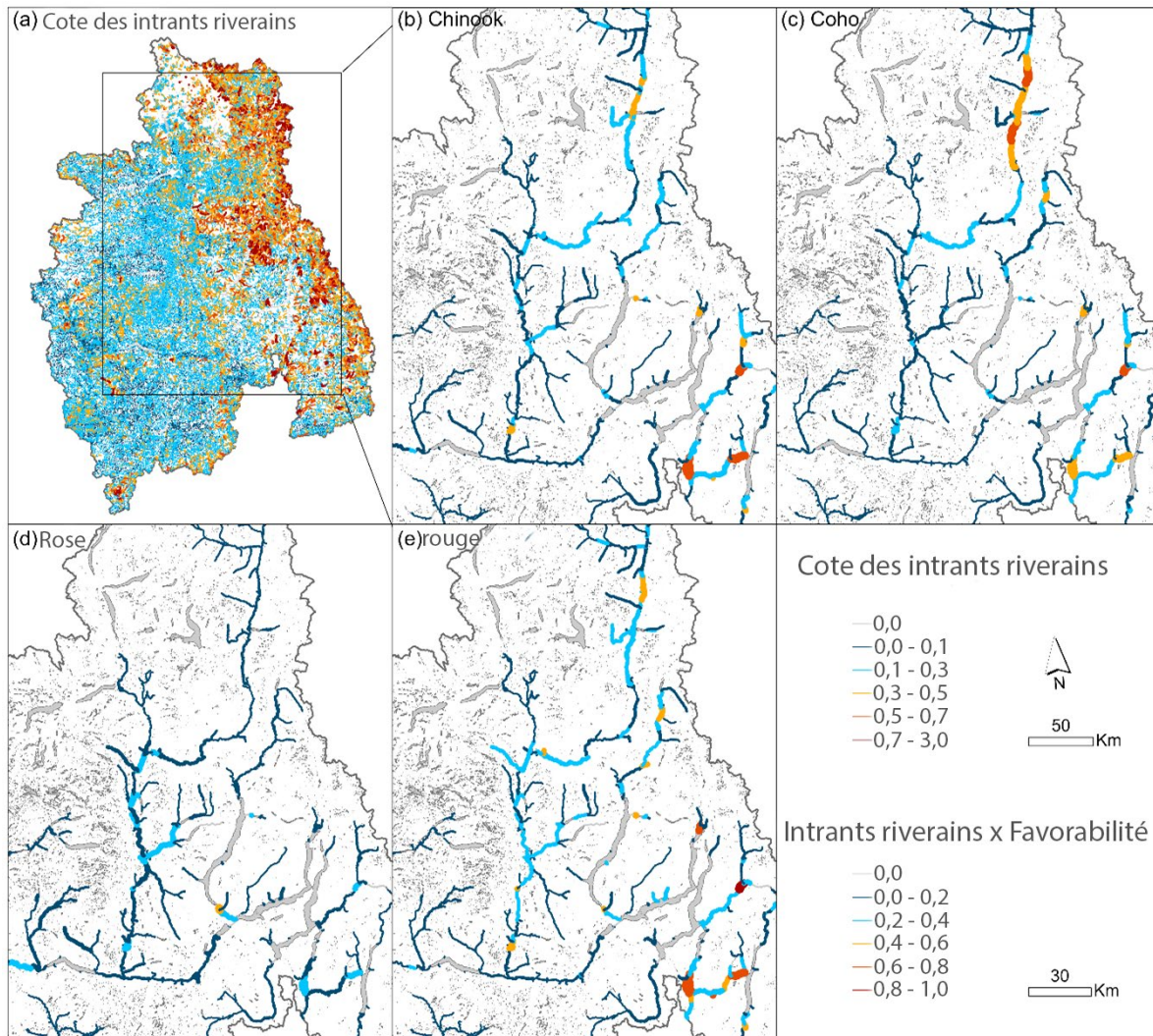


Figure 59. Cote composite des intrants riverains (a) fondée sur les cotes des intrants de sources diffuses et de la perturbation du milieu riverain. La cote des intrants riverains multipliée par la favorabilité environnementale modélisée pour la fraie du saumon (conditions de référence de 1981 à 2020) indiquait des tronçons de cours d'eau accessibles où les valeurs élevées des intrants riverains coïncidaient avec une grande favorabilité environnementale pour (b) le saumon chinook, (c) le saumon coho, (d) le saumon rose et (e) le saumon rouge. Les lignes de cours d'eau sont mises à l'échelle pour mettre en évidence celles qui ont des cotes plus élevées.

L'évaluation de la cote composite des ressources en eau a montré que les emplacements des prélèvements d'eau autorisés correspondaient généralement à des cours d'eau dont les débits mensuels minimaux (%DAM) étaient plus élevés dans l'UHE de Thompson-Nicola (figure 60a).

La cote composite multiplicative indiquait un gradient de cours d'eau ayant des valeurs faibles à élevées d'après la répartition des valeurs dans l'UHE et certaines qui augmentaient dans des conditions climatiques futures (figure 60c-d). Les groupes de bassins hydrographiques ayant obtenu les cotes composites les plus élevées pour les ressources en eau ont été différenciés selon les UC et le statut de risque de chaque espèce de saumon et ont indiqué que le bassin hydrographique de la rivière South Thompson était le seul à avoir obtenu des cotes moyennes élevées pour toutes les espèces (figure 61). L'étendue du bassin hydrographique de la rivière Thompson qui chevauche les UC de saumon rouge non en péril avait la cote composite la plus élevée en raison des allocations de prélèvement d'eau élevées, avec une cote plus faible, mais tout de même notable, pour les UC de saumon rouge en péril. Comme on le voit également sur la carte (figure 60a), les valeurs de débit minimal les plus faibles avaient tendance à correspondre à des allocations de prélèvement d'eau plus faibles (figure 61). Les cotes composites des ressources en eau ont légèrement augmenté entre les conditions historiques (de 1981 à 2010) et futures (de 2040 à 2060) par rapport aux valeurs mensuelles minimales plus basses (%DAM), mais n'ont pas changé les bassins hydrographiques qui avaient les cotes plus élevées (annexe H, figures H1, H2).

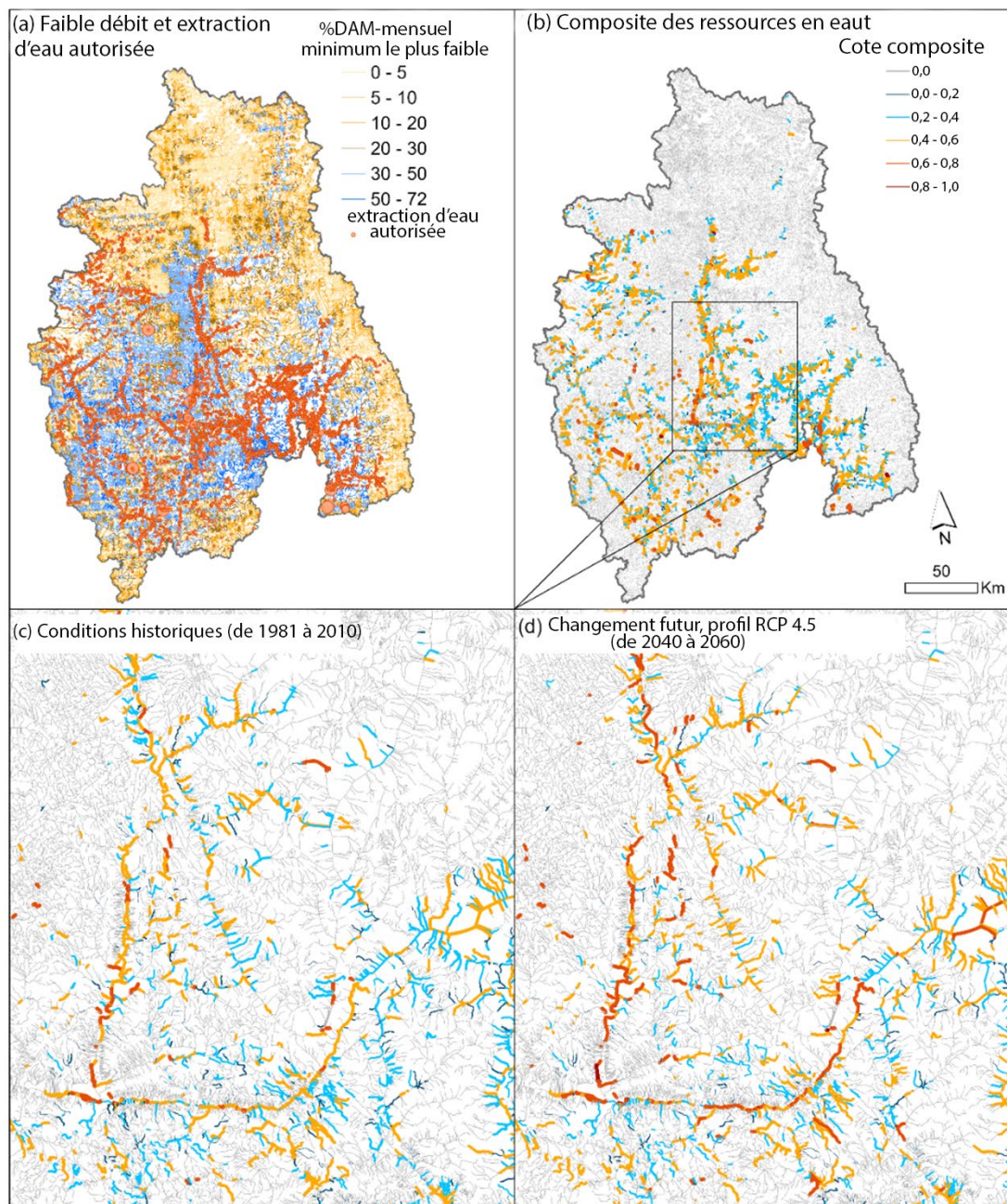


Figure 60. Carte (a) du débit mensuel minimal (%DAM) le plus bas pour chaque tronçon de cours d'eau dans des conditions historiques (de 1981 à 2010) et des quantités autorisées d'extraction d'eau (symboles proportionnels à la quantité autorisée, en m^3/an). La cote composite des ressources en eau (b) était fondée sur une cote multiplicative de l'inverse du débit mensuel minimal (%DAM) le plus faible et de l'extraction d'eau autorisée. Vue agrandie des résultats pour les conditions climatiques (c), historiques et (d) futures (de 2040 à 2060). Les lignes de cours d'eau sur les graphiques b à d sont mises à l'échelle pour mettre en évidence celles qui ont des cotes plus élevées.

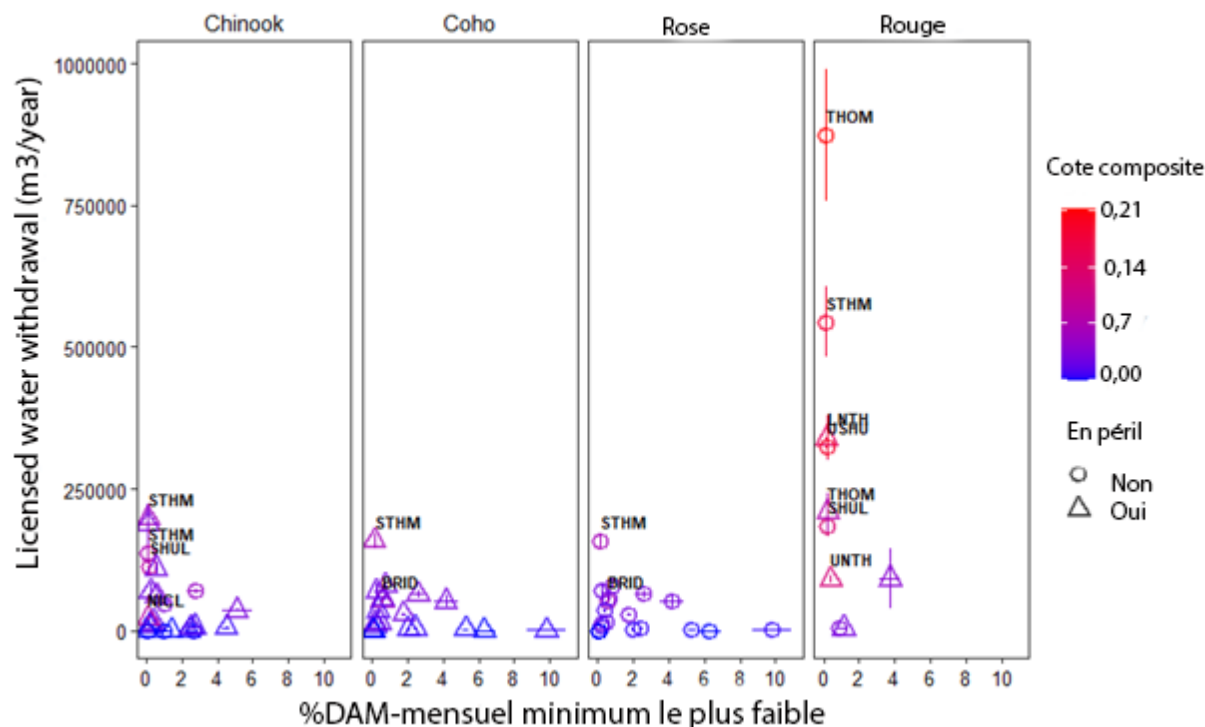


Figure 61. Cote composite des ressources en eau fondée sur l'inverse du débit mensuel minimal (%DAM) le plus faible (c.-à-d. qu'une valeur plus élevée équivaut à un débit plus faible) dans les conditions historiques (de 1981 à 2010) et les quantités d'extraction d'eau autorisées dans l'UHE de Thompson-Nicola. La moyenne des cotes des cours d'eau a été établie par groupe de bassins hydrographiques et les UC de saumon connexes, différenciées par leur statut de risque. Les groupes de bassins hydrographiques ayant une cote composite moyenne supérieure à 0,05 sont étiquetés : ruisseau Bridge (BRID), cours inférieur de la rivière North Thompson (LNTN), rivière Nicola (NCL), lac Shuswap (SHUL), rivière South Thompson (STHM), rivière Thompson (THOM) et cours supérieur de la rivière North Thompson (UNTH). Les points pour les deux axes correspondent à la moyenne ± 1 ET.

La cote composite de la fragmentation pour les espèces anadromes a permis de déterminer plusieurs zones où le réseau de cours d'eau comportait de nombreux blocages, avec une probabilité modérée d'être un habitat de fraie favorable pour le saumon (figure 62). L'habitat favorable bloqué dans les conditions actuelles et futures était le plus élevé dans le groupe du bassin hydrographique du cours supérieur de la rivière Shuswap, suivi de la rivière Adams, pour toutes les espèces de saumons (figure 62; annexe H, figures H3, H4). Les cotes composites pour les barrages individuels et chaque espèce de saumon indiquaient de 3 à 6 barrages focaux par espèce; bon nombre de ces barrages dont la cote était plus élevée étaient les mêmes pour toutes les espèces et tous les scénarios climatiques, notamment le barrage de l'étang du ruisseau Cherry, le barrage du lac Sugar et un barrage dans la municipalité de Rivers and the Peaks (figure 63).

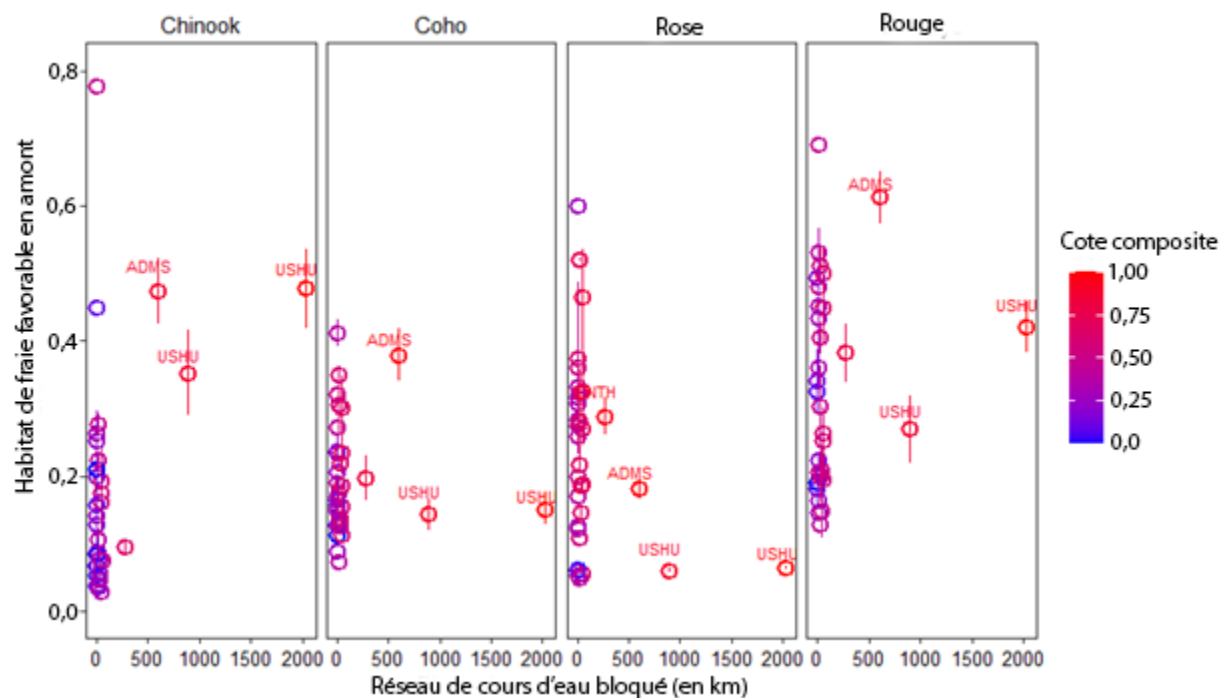


Figure 62. Cote composite de la fragmentation pour les espèces anadromes d'après la quantité bloquée du réseau de cours d'eau en amont d'un barrage initial jusqu'aux obstacles subséquents (naturels ou créés par des barrages) et la moyenne correspondante de l'habitat de fraie favorable modélisé en amont dans l'UHE de Thompson-Nicola. L'habitat de fraie favorable concerne les conditions climatiques actuelles (de 2001 à 2020); les projections futures sont présentées à l'annexe H (figures H3, H4). Les groupes de bassins hydrographiques sont étiquetés pour les cours d'eau bloqués dont les cotes composites sont supérieures à 0,85 et comprennent la rivière Adams (ADMS), le cours inférieur de la rivière North Thompson (LNTH) et la haute Shuswap (USHU). Les points sont la moyenne \pm 1 ET.

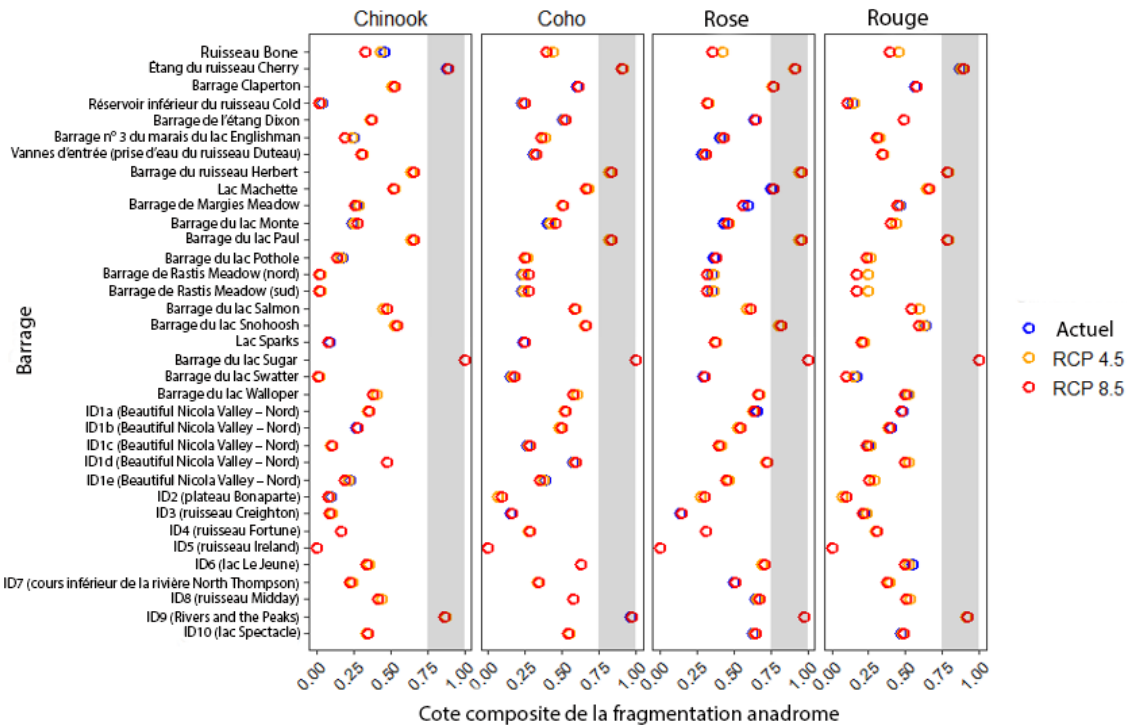


Figure 63. Cote composite de la fragmentation pour les espèces anadromes pour les barrages qui sont le premier blocage du passage en amont dans l'UHE de Thompson-Nicola. Les cotes composites changent avec les scénarios climatiques pour les périodes actuelle (de 2001 à 2020) et future (de 2041 à 2060), car on prévoit des changements dans l'habitat favorable pour la fraie du saumon en fonction des projections de la température de l'eau et des précipitations. Les zones grises mettent en évidence les barrages dont les cotes sont les plus élevées.

4. DISCUSSION

4.1. APERÇU

L'évaluation des menaces cumulatives pour le BFF a fourni des estimations des menaces qui sont directement liées au poisson et à son habitat et qui peuvent être utilisées pour guider les mesures de gestion en :

1. évaluant les menaces jugées importantes par le PPPH et le COSEPAC, y compris les changements climatiques;
2. créant une méthodologie qui tenait compte des effets du débit de l'eau et des effets en aval (c.-à-d. les menaces accumulées par le débit);
3. effectuant les analyses à l'échelle des cours d'eau pour obtenir une résolution plus fine et pouvoir ensuite les résumer à divers niveaux du bassin hydrographique, au besoin;
4. déterminant le chevauchement des étendues du saumon et des espèces en péril;
5. estimant les menaces au niveau de l'influence sur le poisson et son habitat (p. ex. la sédimentation) tout en évaluant les intrants (p. ex. les routes) qui contribuent à ces menaces en vue d'une éventuelle atténuation ou restauration.

Ces attributs sont des composantes des critères qui ont été proposés comme importants pour déterminer la pertinence des outils géospatiaux pour la production de rapports sur l'état des menaces et l'état de l'habitat du poisson (MPO 2022). Les critères qui n'ont pas encore été entièrement abordés, mais qui font partie de la portée de la poursuite et de l'élaboration de la méthodologie fournie ici, doivent couvrir une plus grande partie de la région du Pacifique, réévaluer les indicateurs pour évaluer le changement au fil du temps et établir une cote des effets cumulatifs fondée sur des réponses biologiques quantifiées (c.-à-d. courbes de réponse aux agents de stress) ou sur l'opinion d'experts (voir la section « Évaluation future »; MPO 2022).

Les résultats des menaces cumulatives indiquaient les cotes des menaces cumulatives les plus élevées autour du bas Fraser et le long du plateau intérieur du BFF pour les menaces de l'activité humaine, de la perturbation du paysage et les menaces liées aux changements climatiques. Ces cotes sommaires étaient déterminées en particulier par la perturbation du milieu riverain, les éléments nutritifs et la sédimentation pour les menaces liées à l'activité humaine et par les températures chaudes des cours d'eau pour les menaces liées aux changements climatiques, qui avaient les médianes de cotes les plus élevées. Les routes étaient les intrants les plus fréquents qui ont influencé les menaces liées à l'activité humaine dans l'ensemble du BFF et ont contribué de façon constante à la destruction de l'habitat dans les cours d'eau, à la perturbation du milieu riverain, aux éléments nutritifs et à la sédimentation. Les feux de forêt, la défoliation par les ravageurs forestiers, les parcours naturels et la foresterie ont également contribué à ces menaces. Cette combinaison de résultats renseigne sur les endroits où les menaces estimées pour le poisson et son habitat sont élevées et les principaux facteurs qui sous-tendent ces menaces.

Nous avons comparé les médianes des cotes des menaces entre les UC de saumon et les étendues des espèces en péril entre elles et par rapport à tous les cours d'eau du BFF. Les cotes qui avaient tendance à différer de celles de tous les cours d'eau indiquaient que l'étendue d'une espèce était davantage ou moins exposée à des menaces individuelles ou cumulatives en raison de son emplacement dans le BFF. En particulier, les médianes plus élevées des cotes des menaces de l'activité humaine pour l'étendue d'une espèce en péril peuvent donner une idée des menaces qui limitent le plus l'espèce, bien qu'un lien plus étroit avec l'effet sur l'espèce nécessite de l'information sur les réponses aux menaces (c.-à-d. les courbes de réponse aux agents de stress). La constatation selon laquelle, en général, les médianes des cotes des menaces cumulatives pour la menace de l'activité humaine des espèces en péril dont l'aire de répartition est limitée (p. ex. le chabot de la chaîne côtière, l'esturgeon vert, le naseux de Nooksack et le meunier de Salish) étaient plus élevées par rapport à tous les cours d'eau du BFF correspondait au statut de risque de ces espèces en péril. Les médianes des cotes des menaces de l'activité humaine avaient tendance à être plus semblables entre les espèces de saumons et par rapport à tous les cours d'eau, bien que quelques-unes des UC de saumon rouge menacées et en voie de disparition aient obtenu des médianes des cotes de la menace sensiblement plus élevées. Les résultats de chaque UC peuvent être plus instructifs que les comparaisons sommaires des UC de saumon en péril et non en péril, car ces regroupements couvrent de grandes étendues spatiales qui, de par leur nature, correspondent à une plus grande plage de cotes de menace entre les cours d'eau. Une similitude des cotes indique qu'une UC n'est peut-être pas plus exposée à une menace qu'une autre, mais ces comparaisons relatives ne signifient pas que les menaces estimées n'ont pas d'incidence sur les UC. De plus, une évaluation plus précise pour le saumon pourrait porter sur certains lieux de fraie d'intérêt afin de déterminer les niveaux de menace relatifs pour ces zones, ce qui correspond davantage aux étendues focales des espèces en péril (Boyd *et al.* 2022). Nous avons utilisé les UC de saumon plutôt que les étendues de fraie pour cette évaluation, car les délimitations géospatiales des étendues de fraie ne sont pas entièrement résolues, bien que le

Pacific Salmon Explorer fournisse également des étendues de fraie tirées d'une compilation de données d'observation et de sollicitation d'experts (FSP 2021). Les cotes des menaces de l'activité humaine ont fourni une indication des menaces qui pourraient actuellement limiter les populations, tandis que les cotes des menaces liées aux changements climatiques ont estimé les menaces auxquelles ces espèces pourraient faire face d'ici 2060. L'identification des espèces qui utilisent des zones où l'on prévoit des menaces plus élevées liées aux changements climatiques peut indiquer celles qui sont le plus à risque du fait de ces pressions et dans lesquelles les conditions pourraient changer. Par exemple, l'étendue du meunier de montagne avait la médiane la plus élevée des cotes des menaces cumulatives pour les menaces liées aux changements climatiques, avec des cotes individuelles relativement élevées pour chacune des menaces liées aux changements climatiques comparativement aux autres espèces en péril. L'établissement d'un lien entre ces menaces et les réponses propres aux espèces permettrait de mieux comprendre comment chaque espèce pourrait réagir à ces changements prévus. Pour les espèces anadromes, des analyses, comme la modélisation du cycle biologique qui relie les variables climatiques projetées aux périodes et aux emplacements appropriés des stades du cycle biologique, permettent de comprendre de manière plus détaillée les impacts prévus des changements climatiques (Crozier *et al.* 2021).

4.2. COMPARAISON AVEC D'AUTRES ÉVALUATIONS PERTINENTES

D'autres évaluations des menaces cumulatives couvrent le BFF : le [Pacific Salmon Explorer](#), les [rapports du WWF-Canada sur les bassins hydrographiques](#) et les [Global Threats to Human Water Security and River Biodiversity](#). (RiverThreat; Vörösmarty *et al.* 2010; MPO 2022)

Le PSE a utilisé les données d'entrée sur l'activité humaine et la perturbation du paysage pour représenter les catégories de l'empreinte du développement humain, du processus hydrologique, de la qualité de la végétation, du passage du poisson/de la connectivité de l'habitat, de l'érosion de surface, de la quantité d'eau et de la qualité de l'eau; ces données ont ensuite été regroupées dans des cotes des pressions cumulatives de risque faible, modéré et élevé (PSF 2021). L'évaluation a été effectuée à l'aide des bassins hydrographiques d'évaluation du FWA à l'échelle 1:20 000 dans l'ensemble des bassins hydrographiques de la Colombie-Britannique où vivent des saumons. Le profil général du risque dans l'ensemble du BFF correspondait en grande partie aux cotes des menaces cumulatives pour la menace de l'activité humaine fournies ici, avec des cotes plus élevées semblables le long du bas Fraser et du plateau intérieur. Les différences les plus notables concernaient nos cotes plus élevées dans la partie sud-ouest du bassin hydrographique principal de la rivière Nechako et dans l'étendue sud-est du bassin hydrographique de la rivière South Thompson, où le PSE avait relevé un risque faible. Dans ces régions, nous avons estimé des cotes des menaces élevées pour la fragmentation longitudinale, la perturbation du milieu riverain, les éléments nutritifs et la sédimentation. La perturbation du milieu riverain était la menace la plus directement comparable entre la présente évaluation et le PSE, et a fait apparaître des différences où le PSE avait estimé des cotes de risque plus élevées autour des bassins hydrographiques principaux de la rivière Quesnel et du haut Fraser. Nous avons utilisé des données d'entrée semblables sur l'activité humaine et la perturbation du paysage, ainsi que la même zone tampon de 30 m pour les zones riveraines, mais nous avons appliqué un seuil plus restrictif pour la foresterie (10 ans contre 60 ans), ce qui peut avoir influencé cette différence (PSF 2021). Les méthodes de classification et de visualisation, tout comme la résolution (tronçons de cours d'eau par rapport aux bassins hydrographiques d'évaluation), peuvent également entraîner des différences dans les profils spatiaux observés.

Le WWF a évalué les menaces de la modification du débit, de la pollution, de la perte d'habitat, de la fragmentation de l'habitat, de la surutilisation de l'eau, des espèces envahissantes et des

changements climatiques, et les a classées dans des catégories de niveau de menace allant de très faible à très élevé. Les menaces ont été évaluées à l'échelle des sous-aires de drainage partout au Canada, dont quatre dans le BFF (bas et haut Fraser, Thompson et Nechako). Les résultats du WWF étaient difficiles à comparer aux résultats fournis ici en raison de la grande différence de résolution. Par exemple, sa cote des menaces cumulatives a été évaluée comme élevée, et sa cote des menaces liées aux changements climatiques était modérée pour les quatre sous-aires de drainage. La cotation la plus semblable a été attribuée au niveau de menace élevé des espèces envahissantes dans le sous-bassin du bas Fraser, où nous avons estimé les niveaux de menace des EAE les plus élevés dans le groupe du bassin hydrographique du bas Fraser en particulier. Malgré la difficulté pour établir des comparaisons directes, le Fonds mondial pour la nature (WWF) s'est classé au premier rang dans l'évaluation des outils géospatiaux les plus optimaux pour la production de rapports sur l'état des menaces et l'état de l'habitat du poisson, parmi ceux disponibles en 2022 (MPO 2022). Ce classement était fondé sur une combinaison de la pertinence des menaces évaluées, de la couverture spatiale, des données d'entrée et de la méthodologie (MPO 2022).

RiverThreats est arrivé au deuxième rang dans l'examen des outils géospatiaux et a utilisé des méthodes que nous avons adoptées et que nous avons développées ici (Vörösmarty *et al.* 2010; MPO 2022). Plus précisément, notre cote de la menace de la fragmentation longitudinale pour les espèces résidentes a utilisé la même approche de quantification de la « zone de nage » entre les obstacles, bien que RiverThreats n'ait utilisé que les grands barrages et n'ait pas tenu compte des obstacles naturels (Vörösmarty *et al.* 2010). RiverThreats a également intégré les effets en aval des intrants en utilisant le cheminement de l'écoulement et a estimé la dilution en divisant les intrants accumulés par les taux de débit annuels moyens (Vörösmarty *et al.* 2010), comme nous l'avons fait ici pour les menaces accumulées par le débit. La résolution de RiverThreats est assez grossière (grille de 0,5°, ~55 km), mais avait tendance à avoir des cotes des effets cumulatifs de la biodiversité des cours d'eau aussi élevées autour du bas Fraser et des parties centrales du plateau intérieur du BFF. Comme le PSE, sa cote des effets cumulatifs avait des valeurs plus faibles que la nôtre dans la partie sud-ouest du bassin hydrographique principal de la rivière Nechako, ce qui peut être en partie attribuable à notre cote supplémentaire de la fragmentation longitudinale pour les espèces anadromes, qui était élevée dans cette zone, et au fait que nous avons intégré les feux de forêt dans la cote de la menace de la perturbation du milieu riverain, que RiverThreats n'avait pas inclus dans sa cote de la perturbation du bassin hydrologique (Vörösmarty *et al.* 2010).

Chacun de ces outils géospatiaux fournit des renseignements utiles en fonction du contexte, de l'échelle et de l'étendue spatiale d'intérêt. La méthodologie et les données d'entrée de ces outils et d'autres, notamment le cadre des effets cumulatifs (Cumulative Effects Framework) de la C.-B. (Provincial Aquatic Ecosystems Technical Working Group 2020), ont été examinées et prises en compte dans l'élaboration de l'évaluation des menaces cumulatives présentée ici (MPO 2022). L'évaluation actuelle des menaces cumulatives a été inspirée par le besoin reconnu de combiner une résolution spatiale plus fine propre aux caractéristiques de l'eau douce, les menaces liées aux besoins du MPO pour gérer le saumon et les espèces en péril et produire des rapports sur l'état du poisson et de son habitat, l'avancement de l'estimation des menaces en fonction de l'évolution de la disponibilité des données et l'examen plus détaillé des effets du débit de l'eau et des effets en aval.

4.3. APPLICATION À L'UHE DE THOMPSON-NICOLA

Nous avons donné des exemples d'applications des cotes de menace et des intrants connexes pour guider les décisions de gestion et d'établissement des priorités pour l'habitat du saumon dans l'unité hydrographique écologique (UHE) de Thompson-Nicola, en particulier dans le

contexte des changements climatiques. Comme les résumés sur le BFF, nous avons récapitulé les cotes des menaces individuelles et cumulatives pour les cours d'eau qui se trouvent dans les UC de saumon et en aval des obstacles naturels afin de mettre en évidence les résultats dans l'UHE. Par exemple, les médianes des cotes des menaces liées aux changements climatiques pour le risque d'inondation, le débit faible des cours d'eau et les températures chaudes des cours d'eau avaient tendance à être plus élevées pour les UC de saumon rouge en péril. Nous avons ensuite apparié différentes cotes de menace, données d'entrée et valeurs pour le saumon (c.-à-d. les étendues des UC, l'habitat de fraie favorable) pour mettre en évidence les cours d'eau et les groupes de bassins hydrographiques pour lesquels les estimations de l'exposition aux menaces pertinentes pour le saumon sont plus élevées. Nous avons ainsi montré comment ces sources d'information peuvent être combinées et consultées pour produire des prévisions sur une région qui peuvent guider les mesures de gestion et de restauration à de grandes échelles spatiales. Tout d'abord, la cote composite des effets cumulatifs a montré les intersections entre les menaces cumulatives et les conditions environnementales modélisées favorables à la fraie du saumon. Nous avons résumé ces données au niveau d'un groupe de bassins hydrographiques pour mettre en évidence les bassins hydrographiques où les menaces estimées et les valeurs prévues pour le saumon sont élevées. Il est apparu que les cotes composites cumulatives dans les conditions climatiques actuelles et futures pour toutes les espèces de saumons dans l'UHE étaient plus élevées pour les groupes de bassins hydrographiques des rivières Deadman et Adams. Ensuite, nous avons créé une cote composite des intrants riverains pour indiquer les cours d'eau prioritaires potentiels pour la restauration riveraine en fonction des estimations des intrants de sources diffuses, de la perturbation du milieu riverain et de l'habitat de fraie favorable modélisé. Nous avons ainsi déterminé que les cours d'eau situés le long de la limite est de l'UHE avaient obtenu les cotes les plus élevées. Nous avons alors estimé les endroits où la cote composite des ressources en eau était la plus élevée en fonction de l'allocation de prélèvement d'eau autorisée par des permis et des faibles débits dans les conditions actuelles et futures. Nous avons visualisé graphiquement les espèces de saumons et les groupes de bassins hydrographiques dont l'exposition était plus grande en fonction de l'étendue des UC et avons constaté que le bassin hydrographique de la rivière South Thompson avait des cotes élevées pour toutes les espèces de saumons. Enfin, nous avons calculé la cote composite de la fragmentation pour les espèces anadromes comme la correspondance entre la quantité du réseau de cours d'eau bloquée par un barrage initial et l'habitat de fraie favorable modélisé de ce réseau bloqué pour déterminer les barrages ayant les répercussions estimées les plus importantes sur l'étendue de l'habitat du saumon. Nous avons résumé ces résultats par espèce de saumon, groupe de bassins hydrographiques et barrage. Dans l'ensemble, les bassins hydrographiques de la haute Shuswap et de la rivière Adams, ainsi que le barrage de l'étang du ruisseau Cherry, le barrage du lac Sugar et un barrage dans la municipalité de Rivers and the Peaks avaient des cotes composites de la fragmentation élevées pour toutes les espèces de saumons et les scénarios des changements climatiques. Cette cote était axée sur les barrages déterminés comme des obstacles complets, bien que les barrages enregistrés comme des obstacles partiels et les ponceaux puissent grandement entraver le passage du saumon et pourraient être pris en compte dans les prochaines itérations de cette cote. Les cotes composites des intrants riverains, des ressources en eau et de la fragmentation pour les espèces anadromes ont été élaborées pour fournir de l'information sur certaines activités humaines et perturbations du paysage qui présentent un intérêt pour la gestion et que l'on pourrait peut-être atténuer ou restaurer.

D'autres itérations de menaces et d'intrants combinées à ces valeurs et à d'autres valeurs pour le saumon peuvent être appliquées à mesure que des possibilités et des priorités de gestion différentes se présentent. En particulier, l'habitat de croissance des juvéniles n'a pas encore été

considéré comme une valeur importante pour le saumon. Les emplacements connus de croissance des juvéniles ou d'autres types de modèles de l'utilisation potentielle de l'habitat par le saumon, comme les modèles de potentiel intrinsèque (aussi appelés modèles d'indice de qualité de l'habitat) peuvent être appliqués pour représenter d'autres cours d'eau qui peuvent être importants pour la gestion et la restauration. La Fédération canadienne de la faune a élaboré des modèles de potentiel intrinsèque pour le saumon en Colombie-Britannique (Rebellato et al. 2022). De plus, des modèles régionaux et des données locales sont disponibles pour l'UHE de Thompson-Nicola et il est important de les utiliser en combinaison avec ces résultats, car la méthodologie et les données utilisées ici étaient limitées à ce qui pourrait être appliqué uniformément dans l'ensemble du BFF.

4.4. INCERTITUDES ET LIMITES

Il existe certaines incertitudes communes associées à la production d'évaluations géospatiales des effets cumulatifs. Quelques incertitudes sont associées aux approches générales d'évaluation des agents de stress ou des menaces pour une composante écosystémique focale : s'il faut traiter les couches d'entrée comme ayant la même importance; si la distribution des agents de stress est uniforme dans un format matriciel (matrice); l'endroit où les unités d'évaluation focales sont situées dans une cellule de grille de données matricielles; comment les cotes sont transformées et normalisées (Halpern et Fujita 2013). Nous avons traité les couches d'entrée avec la même importance, à l'exception des charges en pollution, en éléments nutritifs et en sédimentation, pour lesquelles nous avons pu utiliser des estimations des intrants fondées sur l'activité ou l'utilisation des terres. La cellule de grille à une résolution de 10 m pour les couches de la couverture terrestre, de l'utilisation des terres et de la perturbation du paysage correspondait bien à l'étendue des bassins hydrographiques fondamentaux (c.-à-d. l'habitat focal principal), ainsi qu'à la taille des activités humaines et des perturbations courantes comme les routes. Cependant, dans certains cas, une cellule de grille ne chevauchait qu'une partie d'un bassin hydrographique fondamental, et cette grille serait alors attribuée à l'ensemble du bassin hydrographique. On peut faire davantage pour régler ce problème, comme tenir compte de la proportion relative de cette cellule dans le bassin hydrographique, mais cela ajouterait de la complexité à l'analyse, une complexité qui est actuellement jugée supérieure aux avantages. Le plus grand problème pour l'attribution des intrants et des menaces aux cours d'eau (c.-à-d. l'habitat focal secondaire) concernait ceux qui étaient associés à deux bassins hydrographiques fondamentaux ou plus. C'est le cas pour les grands cours d'eau (p. ex. fleuve Fraser, rivière Thompson) où le bassin hydrographique local d'un tronçon de cours d'eau est composé de plusieurs bassins hydrographiques fondamentaux qui comprennent la superficie de la surface de la rivière de chaque côté de l'axe longitudinal du cours d'eau et l'aire de drainage des rives gauche et droite; les bassins hydrographiques fondamentaux des cours d'eau plus petits comprennent toute la superficie de la surface qui se déverse dans un tronçon. Pour ces cours d'eau plus grands, nous avons dû attribuer des intrants des deux côtés, ce qui a nécessité des étapes de traitement supplémentaires. Une autre incertitude concerne l'exactitude des délimitations du réseau de cours d'eau du FWA, avec des problèmes connus comme les surestimations des cours d'eau d'amont dans les régions intérieures et les sous-estimations dans les régions côtières, dont il sera important de tenir compte lorsqu'on appliquera cette évaluation à d'autres bassins. Sur le terrain, il faudra peut-être superposer les résultats aux images satellitaires (comme Google Earth) afin de déterminer pleinement où les cours d'eau s'alignent.

En dressant une carte globale des impacts anthropiques sur les écosystèmes marins, Halpern et ses collaborateurs (2008a) ont transformé et remis à l'échelle les facteurs pour permettre des comparaisons directes. Halpern et Fujita (2013) ont ensuite suggéré qu'il est justifié de conserver l'asymétrie des agents de stress, car elle représente des différences réelles entre les

niveaux des agents de stress. Nous avons choisi de transformer les menaces, car les menaces fondées sur la présence ou l'absence avaient des valeurs élevées beaucoup plus fréquentes (p. ex. la menace des EAE) que celles fondées sur les concentrations ou l'étendue (p. ex. la pollution). Cependant, les différences inhérentes dans les cotes ont influencé leur contribution à la menace cumulative. En particulier, la température des cours d'eau avait des cotes plus élevées que les autres menaces liées aux changements climatiques et a donc contribué davantage à la cote de ces menaces cumulatives. La cote des menaces cumulatives classées a fourni une approche comparative qui a permis de mieux réduire les différences entre les distributions des cotes des menaces, mais qui surreprésentait ou sous-représentait les différences entre les valeurs des cotes à l'intérieur des menaces. Les profils géospatiaux entre les deux méthodes de cotation des menaces cumulatives étaient à peu près les mêmes. Nous avons axé nos sommaires des résultats sur les cotes des menaces individuelles ainsi que sur les menaces cumulatives, car la vulnérabilité à ces menaces et les pondérations ou courbes de réponse subséquentes pour produire une cote des effets cumulatifs (Halpern et Fujita 2013) n'ont pas encore été traitées.

Une autre incertitude associée à ces analyses géospatiales réside dans le fait que les cotes dérivées sont souvent fondées sur des valeurs approximatives plutôt que sur des mesures directes (MPO 2022). Nous avons cherché à créer une correspondance plus directe entre les valeurs approximatives et l'habitat du poisson afin de réduire cette incertitude en partie, par exemple en utilisant les valeurs d'entrée pour les éléments nutritifs, la pollution et la sédimentation recueillies par Environnement et Changement climatique Canada (2022) et d'autres sources connues, plutôt que d'associer simplement l'empreinte des activités humaines terrestres à l'habitat du poisson. Les données sur les polluants produites par l'OIPABP d'ECCC sont des estimations fondées sur les données de surveillance disponibles et comprennent des extrapolations pour combler les lacunes; elles comportent donc également des incertitudes et sont sujettes à changement à mesure que d'autres données deviennent disponibles. Nous avons également intégré certains des mécanismes par lesquels les activités humaines et les perturbations du paysage contribuent aux menaces pesant sur l'habitat du poisson, bien que ces mécanismes soient fondés sur des approximations généralisées. Par exemple, la mesure dans laquelle les zones tampons riveraines, le ruissellement et le débit du cours d'eau influent sur la sédimentation dans un cours d'eau dépend du contexte et n'a pu être représentée à ce stade que par des relations simples. Certaines menaces présentent moins d'incertitude à cet égard, par exemple la perturbation du milieu riverain d'après des données satellitaires et les empreintes connues de l'utilisation des terres, ou la fragmentation longitudinale fondée sur les barrages et les obstacles naturels qui ont été évalués comme bloquant le passage du poisson. Cependant, les sources de données peuvent aussi contenir des erreurs; par exemple, il y a des taux d'erreur connexes dans la classification de l'utilisation des terres à partir de l'imagerie satellitaire selon l'algorithme appliqué, et certains barrages identifiés comme obstacles n'ont pas été vérifiés. L'incertitude entourant les menaces accumulées par le débit peut être quantifiée à l'aide de données in situ, à condition qu'une série chronologique adéquate sur l'échantillonnage soit fournie, mais ces données sont actuellement limitées (voir la section « Évaluation future »). On pourrait aussi quantifier l'incertitude relative à la menace de modification du débit lorsqu'il existe des données chronologiques sur le débit du cours d'eau avant et après sa modification; cette possibilité serait principalement limitée aux emplacements des postes de marégraphie.

Nous avons cerné les incertitudes et les limites de chaque menace, ainsi que la capacité d'étendre les évaluations des menaces à d'autres bassins de la région du Pacifique (tableau 2). Des taux de confiance qualitatifs ont également été appliqués à chaque menace en fonction des incertitudes et des limites relevées, selon les catégories utilisées dans la méthode d'évaluation des risques pour le saumon. Les taux de confiance ont été définis comme étant faibles pour

cinq menaces (les données existent, mais sont considérées comme étant de mauvaise qualité ou contradictoires), moyens pour quatre menaces (il existe des données, mais avec d'importantes lacunes) et élevés pour quatre menaces (les données existent et sont considérées comme solides; tableau 2). Il serait utile de poursuivre les travaux visant à quantifier les intervalles de confiance pour les cotes des menaces. Une analyse de sensibilité peut être effectuée pour déterminer comment les hypothèses ou les valeurs appliquées ont influencé les cotes des menaces, par exemple, lorsqu'il existe une gamme d'attentes raisonnables pour un intrant appliqué à une menace ou lorsqu'il y a de multiples intrants modélisés inclus dans une seule cote. Par exemple, on pourrait appliquer une pondération différente aux activités détruisant l'habitat dans les cours d'eau en fonction des avis d'experts plutôt que de les traiter comme étant également destructrices, ou mettre à l'essai une plage de coefficients plausibles pour les charges sédimentaires de source diffuse provenant de l'utilisation des terres. De telles itérations de la cotation indiqueraient la mesure dans laquelle ces décisions modifient les cotes et sont particulièrement pertinentes si les comparaisons relatives entre les cours d'eau changent.

Tableau 2. Incertitudes, limites, capacité d'étendre la méthodologie au reste de la région du Pacifique et taux de confiance pour chaque menace estimée. Les taux de confiance sont « faible » (les données existent, mais sont considérées comme faibles ou contradictoires), « moyen » (les données existent, mais il existe d'importantes lacunes) et « élevé » (les données existent et sont considérées comme solides); les principaux facteurs décisifs pour les cotes sont entre parenthèses.

Sources d'incertitude	Limites	Extension	Taux de confiance
<i>Composantes écosystémiques focales</i>			
<ul style="list-style-type: none"> • Les délimitations des tronçons de cours d'eau du FWA comportent des inexactitudes. • Les délimitations de l'habitat des espèces en péril peuvent ne pas englober l'entièreté de leur utilisation de l'habitat. 	<ul style="list-style-type: none"> • La truite arc-en-ciel n'a pas été incluse par la portée initiale, mais il serait avantageux de l'inclure dans les évaluations futures en tant qu'espèce dont les populations ont été évaluées par le COSEPAC comme étant en voie de disparition. 	<ul style="list-style-type: none"> • Faisable pour la Colombie-Britannique • Le réseau hydrographique national pourrait être utilisé pour le Yukon, avec un traitement et une préparation supplémentaires des bassins hydrographiques fondamentaux. 	Moyen (en raison de l'incertitude entourant la saisie de l'entièreté de l'étendue de l'habitat des espèces en péril)
<i>Espèces aquatiques envahissantes</i>			
<ul style="list-style-type: none"> • Répartition approximative des polygones de l'aire de répartition de chaque espèce d'après les observations et un rayon de recherche de 10 km; la répartition réelle de chaque espèce est inconnue. • Détermination d'un statut d'espèce aquatique envahissante par rapport aux espèces non indigènes (c.-à-d. aucun effet consigné). • L'incidence de chaque espèce sur les composantes écosystémiques focales n'est pas entièrement connue. 	<ul style="list-style-type: none"> • Seules des observations d'espèces provenant de relevés opportunistes sont disponibles. • Une délimitation plus poussée de la répartition de chaque espèce (p. ex. à partir de modèles de répartition des espèces) améliorerait l'exactitude de cette cote. • Information limitée sur chaque espèce non indigène et sur les interactions avec les composantes écosystémiques focales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Faisable pour la Colombie-Britannique • Nécessite des données équivalentes pour le Yukon. 	Moyen (en raison de l'incertitude liée à la saisie de l'entièreté de la répartition des EAE).
<i>Fragmentation longitudinale</i>			
<ul style="list-style-type: none"> • Les pentes abruptes peuvent constituer un obstacle naturel pour d'autres espèces, mais elles n'ont 	<ul style="list-style-type: none"> • Connaissances limitées sur les pentes en tant qu'obstacles pour les poissons résidents; 	<ul style="list-style-type: none"> • Faisable pour la Colombie-Britannique 	Moyen (basé sur une évaluation prudente en utilisant

Sources d'incertitude	Limites	Extension	Taux de confiance
<p>été prises en compte que pour le saumon du Pacifique.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les obstacles au passage créés par les ponceaux ne sont pas connus pour tous les ponceaux du BFF, et n'ont pas été inclus dans la cotation des menaces. • Il est possible que des passages au-dessus des barrages et des obstacles naturels aient été inclus comme des blocages du passage. • Des obstacles partiels peuvent bloquer complètement le passage selon la situation, mais ils n'ont pas été inclus dans la cotation de la menace. 	<p>nécessiterait des cotes de menace propres à chaque espèce.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Évaluations limitées des ponceaux en tant qu'obstacles pour l'étendue du BFF. • Les obstacles au passage créés par les ponceaux n'ont pas été inclus. • Manque d'information détaillée sur les barrages constituant des obstacles partiels. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite des données équivalentes pour le Yukon. 	<p>uniquement les barrages comme obstacles complets).</p>
<i>Fragmentation latitudinale</i>			
<ul style="list-style-type: none"> • Mesure dans laquelle les infrastructures de contrôle des plaines inondables limitent les déplacements latitudinaux à partir d'un tronçon de cours d'eau donné. 	<ul style="list-style-type: none"> • Simple évaluation de la présence ou de l'absence d'une association entre les structures de lutte contre les inondations et les tronçons des cours d'eau. • La superficie d'habitat de plaine inondable reliée à un tronçon de cours d'eau donné n'a pas encore été délimitée. • Ne tient pas encore compte d'autres éléments qui pourraient limiter les mouvements latitudinaux (p. ex. routes, chemins de fer). • Les données spatiales sur la canalisation ne sont pas disponibles et ne sont donc pas représentées en dehors de celles qui sont prises en compte 	<ul style="list-style-type: none"> • Faisable pour la Colombie-Britannique • Nécessite des données équivalentes pour le Yukon. • Nécessité de tenir compte des autres longueurs de transects utilisées pour saisir les infrastructures de lutte contre les inondations lors de l'application à d'autres bassins. 	<p>Faible (en raison de l'absence d'association avec l'habitat latéral)</p>

Sources d'incertitude	Limites	Extension	Taux de confiance
	par les couches de la couverture des terres urbaines et des infrastructures de lutte contre les inondations.		
<i>Destruction de l'habitat dans les cours d'eau</i>			
<ul style="list-style-type: none"> • Les activités humaines ont toutes été traitées de la même façon et il n'existe aucune évaluation actuelle de l'intensité. • Les données sur les routes des industries forestière et pétrolière et gazière étaient fondées sur les tenures (c.-à-d. que les routes n'ont peut-être pas été construites ou peuvent avoir été déclassées); des routes qui n'ont pas été saisies par cet ensemble de données peuvent être présentes dans le paysage. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aucune définition actuelle des activités qui peuvent être plus nocives pour l'habitat dans les cours d'eau que les autres. • Les activités sur les terres privées n'étaient pas explicitement incluses, mais étaient largement représentées par les autres couches d'activités humaines et de couverture des terres, en s'appuyant sur l'inspection visuelle des couches. 	<ul style="list-style-type: none"> • Faisable pour la Colombie-Britannique • Nécessite des données équivalentes pour le Yukon. 	Élevé (en raison de données d'entrée robustes et exhaustives pour évaluer la présence de perturbations).
<i>Modification du débit</i>			
<ul style="list-style-type: none"> • Les activités humaines sont toutes traitées de la même façon, mais ont probablement des contributions variables. • Le prélèvement d'eau est basé sur les allocations maximales autorisées par les permis, la quantité réelle prélevée est inconnue. • Les prélèvements comprennent à la fois les prélèvements d'eaux souterraines et d'eaux de surface, qui peuvent avoir des répercussions différentes sur l'écoulement; ces différences n'ont pas été prises en compte. 	<ul style="list-style-type: none"> • Il n'y a pas de désignation actuelle ou de données cohérentes sur les caractéristiques qui font en sorte que les barrages et les ponceaux ont une incidence plus élevée sur les régimes d'écoulement. • Les données sur la quantité d'eau prélevée ne sont pas disponibles. • Les données sur les prélèvements d'eau domestiques non autorisés (p. ex. prévention des incendies, habitations privées) en 	<ul style="list-style-type: none"> • Faisable pour la Colombie-Britannique • Nécessite des données équivalentes pour le Yukon. 	Faible (en raison du manque d'information sur les prélèvements d'eau, c.-à-d. la quantité prélevée et l'association avec les niveaux de débit saisonniers).

Sources d'incertitude	Limites	Extension	Taux de confiance
<ul style="list-style-type: none"> • Les effets en aval et en amont des barrages et de l'extraction d'eau ne sont pas pris en compte. • D'autres utilisations des terres, en particulier les perturbations des forêts, peuvent avoir des effets importants sur le débit des cours d'eau, qui n'ont pas été inclus. 	<p>Colombie-Britannique ne sont pas disponibles.</p> <ul style="list-style-type: none"> • À l'heure actuelle, il n'y a pas de relation générale pour tenir compte des effets en amont et en aval des barrages et des prélèvements d'eau sur le débit. • Idéalement, il faut appliquer des données sur l'intensité des feux de forêt et la récolte, ainsi que sur les relations générales, pour tenir compte de l'effet des perturbations des forêts sur la modification du débit. 		
<i>Perturbation du milieu riverain</i>			
<ul style="list-style-type: none"> • Les activités humaines ont toutes été traitées de la même façon et il n'existe aucune évaluation actuelle de l'intensité. • Le calendrier pertinent relatif aux feux et à la foresterie à inclure dépend de la fonction riveraine d'intérêt. • Les données sur les routes des industries forestière et pétrolière et gazière étaient fondées sur les tenures (c.-à-d. que les routes n'ont peut-être pas été construites ou peuvent avoir été déclassées); des routes qui n'ont pas été saisies par cet ensemble de données peuvent être présentes dans le paysage. • Zone tampon riveraine basée sur la norme de 30 m, mais d'autres distances tampons peuvent être 	<ul style="list-style-type: none"> • Évaluations actuellement limitées des largeurs de zone tampon nécessaires pour maintenir différentes fonctions riveraines, en fonction du système. • Zone riveraine basée sur les rivages statiques des cours d'eau et des rivières (ne tient pas compte de tout changement dans la position du cours d'eau au fil du temps). • Les activités sur les terres privées n'étaient pas explicitement incluses, mais étaient largement représentées par les autres couches d'activités humaines et de couverture des terres, en s'appuyant sur l'inspection visuelle des couches. 	<ul style="list-style-type: none"> • Faisable pour la Colombie-Britannique • Nécessite des données équivalentes pour le Yukon. • Nécessité de tenir compte des différences dans les périodes de rétablissement des zones riveraines (p. ex. après une perturbation de la forêt) pour d'autres bassins et climats. 	Élevé (en raison de données d'entrée robustes et exhaustives pour l'évaluation de la présence de perturbations, actuellement axées sur la fonction riveraine de filtrage).

Sources d'incertitude	Limites	Extension	Taux de confiance
<p>importantes, en fonction du système.</p> <ul style="list-style-type: none"> Le niveau de défoliation par les ravageurs forestiers qui devrait être considéré comme étant une perturbation dépend de la fonction riveraine d'intérêt. 	<ul style="list-style-type: none"> Il ne s'agit pas d'une évaluation exhaustive de la perturbation pour toutes les fonctions riveraines; actuellement axé sur la capacité de filtrage. 		
Éléments nutritifs			
<ul style="list-style-type: none"> Les intrants liés à l'utilisation des terres dépendent probablement du contexte, mais ils ont été appliqués en tant que coefficient de concentration unique (et en tenant compte des débits de ruissellement). Les intrants de sources ponctuelles pour les charges en effluents ont été estimés en utilisant les données de surveillance environnementale disponibles, et les estimations ont été effectuées en fonction des corrélations pour combler les lacunes dans les données (ECCC 2022). Les coefficients des sources diffuses ont été dérivés de ressources documentaires limitées, y compris de l'ouest des États-Unis (ECCC 2022). Les coefficients de concentration des apports en nutriments provenant des perturbations liées aux forêts (blocs de coupe, feux, défoliation par les ravageurs) ont été estimés en fonction de l'effet 	<ul style="list-style-type: none"> Documentation et données sur les intrants liés à l'utilisation des terres limitées pour calculer les coefficients de contribution. Dépend de l'étendue des données de l'OIPABP (ECCC 2022) et des couches hydrologiques à haute résolution. 	<ul style="list-style-type: none"> Nécessite des couches hydrologiques à haute résolution pour les autres bassins (voir la menace liée au « débit des cours d'eau »). Avec des couches hydrologiques, réalisable pour le BFF, l'île de Vancouver, Haida Gwaii et les bassins hydrographiques côtiers, en fonction de l'étendue selon l'OIPABP (ECCC 2022). 	<p>Faible (en raison de l'information incomplète sur les intrants de sources diffuses et des hypothèses généralisées pour l'accumulation en aval et le filtrage riverain).</p>

Sources d'incertitude	Limites	Extension	Taux de confiance
<p>relatif par rapport à la classification « Autres zones non urbaines ».</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le calendrier pertinent relatif aux feux et à la foresterie à prendre en compte peut être variable. • Les données sur les routes des industries forestière et pétrolière et gazière étaient fondées sur les tenures (c.-à-d. que les routes n'ont peut-être pas été construites ou peuvent avoir été déclassées); des routes qui n'ont pas été saisies par cet ensemble de données peuvent être présentes dans le paysage. • Les dépendances au contexte plus complexes de la capacité de filtrage riveraine ne sont pas prises en compte. • Les dynamiques de sédimentation plus complexes et localisées ne sont pas prises en compte. • Utilise des ruissellements et des débits de cours d'eau tirés de modèles hydrologiques qui ont été soumis à une réduction d'échelle, avec une incertitude associée. 			
Pollution			
<ul style="list-style-type: none"> • Les intrants relatifs à l'utilisation des terres dépendent probablement du contexte, mais ont été appliqués en tant que coefficient unique (et en tenant compte des débits de ruissellement). 	<ul style="list-style-type: none"> • Documentation et données sur les intrants liés à l'utilisation des terres limitées pour calculer les coefficients de contribution. • Dépend de l'étendue des données de l'OIPABP (ECCC 2022) et des couches 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite des couches hydrologiques à haute résolution pour les autres bassins (voir la menace liée au « débit des cours d'eau »). • Avec des couches hydrologiques, réalisable pour le BFF, l'île de Vancouver, 	<p>Faible (en raison de l'information incomplète sur les intrants de sources diffuses et des hypothèses généralisées pour l'accumulation en aval et le filtrage riverain).</p>

Sources d'incertitude	Limites	Extension	Taux de confiance
<ul style="list-style-type: none"> • Les intrants de sources ponctuelles pour les charges en effluents ont été estimés en utilisant les données de surveillance environnementale disponibles, et les estimations ont été effectuées en fonction des corrélations pour combler les lacunes dans les données (ECCC 2022). • Les coefficients des sources diffuses ont été dérivés de ressources documentaires limitées, y compris de l'ouest des États-Unis (ECCC 2022). • N'inclut pas les rejets atmosphériques, car les taux de dépôt dans un cours d'eau donné étaient incertains. • Les contributions des polluants provenant des sédiments fluviaux n'ont pas été incluses (ECCC 2022). • Les dépendances au contexte plus complexes de la capacité de filtrage riveraine ne sont pas prises en compte. • Les dynamiques de sédimentation plus complexes et localisées ne sont pas prises en compte. • Tous les polluants ont été traités en tant qu'exposition seulement, mais leurs effets sur la santé des poissons et de l'écosystème varient. 	hydrologiques à haute résolution.	Haida Gwaii et les bassins hydrographiques côtiers, en fonction de l'étendue selon l'OIPABP (ECCC 2022).	

Sources d'incertitude	Limites	Extension	Taux de confiance
<i>Sédimentation</i>			
<ul style="list-style-type: none"> • Les intrants relatifs à l'utilisation des terres dépendent probablement du contexte, mais ont été appliqués en tant que coefficient unique (et en tenant compte des débits de ruissellement). • Le calendrier pertinent relatif aux feux et à la foresterie à inclure peut être variable. • Les données sur les routes des industries forestière et pétrolière et gazière sont fondées sur les tenures (c.-à-d. que les routes n'ont peut-être pas été construites ou peuvent avoir été déclassées); des routes qui n'ont pas été saisies par cet ensemble de données peuvent être présentes dans le paysage. • Les dépendances au contexte plus complexes de la capacité de filtrage riveraine ne sont pas prises en compte. • Les dynamiques de sédimentation plus complexes et localisées ne sont pas prises en compte. • Les coefficients des sources diffuses ont été dérivés de ressources documentaires limitées, y compris de l'ouest des États-Unis (ECCC 2022). 	<ul style="list-style-type: none"> • Documentation et données sur les intrants liés à l'utilisation des terres limitées pour calculer les coefficients de contribution. • Moins de documentation et de données disponibles sur la sédimentation que sur les éléments nutritifs et la pollution. • Dépend de l'étendue des données de l'OIPABP (ECCC 2022) et des couches hydrologiques à haute résolution. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite des couches hydrologiques à haute résolution pour les autres bassins (voir la menace liée au « débit des cours d'eau »). • Avec des couches hydrologiques, réalisable pour le BFF, l'île de Vancouver, Haida Gwaii et les bassins hydrographiques côtiers, en fonction de l'étendue selon l'OIPABP (ECCC 2022). 	<p>Faible (en raison de l'information incomplète sur les intrants de sources diffuses et des hypothèses généralisées pour l'accumulation en aval et le filtrage riverain).</p>

Sources d'incertitude	Limites	Extension	Taux de confiance
<i>Risque d'inondation</i>			
<ul style="list-style-type: none"> • D'après des modèles pour l'étendue du Canada, avec une incertitude associée (Mohanty et Simonovic 2021). • Modèles produits à une résolution plus basse par rapport aux autres couches de données utilisées (1 km²). • Les modèles d'inondation sont considérés comme étant très incertains. 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation limitée pour une étude à une résolution plus fine. • N'évalue pas le changement dans la probabilité d'occurrence d'une inondation d'une ampleur donnée. • Mesure basée sur une seule période de retour. 	<ul style="list-style-type: none"> • Faisable pour toute la région du Pacifique en fonction de l'étendue du modèle. 	Faible (en raison de l'incertitude élevée associée aux projections des inondations).
<i>Débit du cours d'eau – Élevé et faible</i>			
<ul style="list-style-type: none"> • Basé sur des modèles hydrologiques (Schnorbus 2020) avec une incertitude associée; certains mois donnent de meilleurs résultats que d'autres. • Une incertitude liée à la réduction de l'échelle des modèles, bien qu'une correspondance étroite ait été constatée entre les résolutions de l'échelle initiale et de l'échelle réduite. • Facteur de correction utilisé pour ajuster les prévisions du débit des cours d'eau aux principaux barrages où la régulation du débit a été surveillée; non ajusté pour les barrages sans données hydrométriques connexes. 	<ul style="list-style-type: none"> • La réduction d'échelle n'est actuellement effectuée que pour le BFF. • Le pourcentage d'écart absolu moyen est calculé en fonction de valeurs mensuelles plutôt que quotidiennes, compte tenu des contraintes actuelles en matière de données. • N'inclut pas les événements extrêmes comme les rivières atmosphériques ou les sécheresses. 	<ul style="list-style-type: none"> • Besoin de couches hydrologiques à haute résolution pour les autres bassins. • Des modèles à échelle plus fine (résolution des bassins hydrographiques fondamentaux) sont en train d'être élaborés par le Pacific Climate Impacts Consortium pour les bassins hydrographiques fréquentés par le saumon en C.-B.; la livraison devrait avoir lieu en 2026. 	Élevé (modèles bien établis avec méthode de réduction d'échelle validée).
<i>Température des cours d'eau</i>			
<ul style="list-style-type: none"> • Basé sur des modèles statistiques de température des cours d'eau, 	<ul style="list-style-type: none"> • Modèles élaborés pour des bassins hydrologiques d'une superficie d'au moins 1 km² en 	<ul style="list-style-type: none"> • Faisable pour la Colombie-Britannique, en fonction de l'étendue du modèle. 	Élevé (modèles validés qui fonctionnent bien par rapport à

Sources d'incertitude	Limites	Extension	Taux de confiance
avec une incertitude associée (Weller <i>et al.</i> 2023). <ul style="list-style-type: none">• Inclut implicitement l'effet des perturbations de l'utilisation des terres sur les températures des cours d'eau en fonction de l'ajustement du modèle aux données sur les lieux, mais ne modélise pas explicitement ces effets.	fonction des données in situ disponibles (généralement des cours d'eau de 3 ^e ordre ou plus; Weller <i>et al.</i> 2023). <ul style="list-style-type: none">• N'inclut pas les événements extrêmes, comme les dômes de chaleur.	<ul style="list-style-type: none">• Besoin de données sur la température des cours d'eau sur les lieux plus exhaustives pour que le Yukon produise et valide des modèles.	d'autres modèles de température à grande échelle).

Les limites des données n'ont pas permis d'évaluer certaines menaces énumérées dans la politique (MPO 2019a) et le guide¹ du PPPH. Nous donnons ici un bref aperçu de chaque menace en ce qui a trait au poisson d'eau douce et à son habitat, ainsi que des avenues et des limites possibles pour mener l'évaluation à l'aide de méthodes géospatiales :

1. **Surexploitation du poisson et des espèces gérées par la province** : La surexploitation du poisson et des espèces gérées par la province est une menace d'importance à prendre en compte pour les espèces pêchées (Post *et al.* 2015). Il faut évaluer les données sur les rendements durables et les prises pour pouvoir estimer la surexploitation (de Kerckhove *et al.* 2015). Les données exhaustives sur les prises en eau douce ne sont actuellement pas disponibles ou accessibles à de vastes échelles spatiales en Colombie-Britannique.
2. **Changement de l'habitat aquatique et de la végétation** : Les changements dans l'habitat aquatique et la végétation peuvent avoir une incidence sur la disponibilité des refuges et des proies pour les poissons. Les habitats non ombragés où la production de macrophytes est plus importante peuvent mener à des densités plus élevées de saumons et de leurs proies que les habitats non végétalisés (Riley *et al.* 2009; McCormick et Harrison 2011). On a également observé un plus grand nombre d'espèces de poissons et une composition différente dans des habitats d'eau plus limpide et végétalisés que dans des habitats turbides et non végétalisés (Miller *et al.* 2018). La végétation aquatique sous-marine a été évaluée sur le plan géospatial à l'aide de méthodes de télédétection dans des eaux peu profondes limpides; les eaux profondes ou turbides obscurcissent la réflexion de la végétation sous-marine, ce qui la rend difficile à détecter et à identifier (Rowan et Kalacska 2021). Une grande variété de capteurs acoustiques (p. ex. échosondeurs) et électromagnétiques (p. ex. LiDAR bathymétrique) sont déployés pour mettre à l'essai des applications de cartographie et d'identification de la végétation sous-marine (Rowan et Kalacska 2021). Bien que ces méthodes soient très prometteuses pour les évaluations de l'habitat du poisson, elles sont actuellement souvent limitées à de plus petites échelles spatiales en raison du traitement intensif des données, et le coût de l'équipement peut être prohibitif.
3. **Changement dans l'oxygène dissous** : Les faibles niveaux d'oxygène dissous (OD), et plus particulièrement les épisodes hypoxiques, sont une préoccupation majeure pour le saumon pendant la migration et la croissance (Sergeant *et al.* 2023), ainsi que pour les poissons d'eau douce résidents, y compris les espèces en péril en Colombie-Britannique (Rosenfeld *et al.* 2021). Les efforts récents de modélisation de l'OD et d'application des relations modélisées sur une grande étendue spatiale comprennent (1) l'évaluation de modèles statistiques et de lois d'échelle pour les bassins hydrographiques dans les États américains contigus (Abdul-Aziz et Gebreslase 2023) et (2) les estimations relatives de la vulnérabilité à l'hypoxie en association avec les densités élevées de saumons près des écloséries en Alaska (Sergeant *et al.* 2023). Aux États-Unis, l'OD était en grande partie prédit par la température de l'eau et ensuite par le pH et le PT (Abdul-Aziz et Gebreslase 2023). L'importance de la température de l'eau est liée à une plus faible solubilité de l'oxygène et à des taux plus élevés de respiration microbienne à des températures plus chaudes. Les éléments nutritifs (PT et azote total, NT) étaient moins dominants dans les terres végétalisées (53 % des bassins hydrographiques représentés dans l'étude) et seraient probablement plus importants dans la modélisation des terres agricoles (35 % des bassins hydrographiques; Abdul-Aziz et Gebreslase 2023). En Alaska, on a constaté que la vulnérabilité à l'hypoxie était la plus forte dans les cours d'eau à faible gradient, quelle que soit la température de l'eau, en raison des faibles taux de réaération (Sergeant *et al.* 2023). Un effort de modélisation géospatiale approfondie de la vulnérabilité à l'hypoxie pour la Colombie-Britannique peut être possible à l'aide d'une combinaison des paramètres de ces deux modèles, mais exige des données in situ exhaustives sur l'OD pour la modélisation et

la validation, des couches à haute résolution sur le débit et les attributs des chenaux des cours d'eau, qui en sont à divers stades de développement et de perfectionnement pour la Colombie-Britannique. Les mesures spatialement continues du PT, du NT et du pH ne sont pas disponibles, bien que des estimations des intrants d'éléments nutritifs d'origine humaine tirées de la cote de la menace des éléments nutritifs puissent être utiles. La section Écosystèmes d'eau douce (MPO) explore ce genre de travail.

4. **Changement dans la disponibilité de la nourriture** : La variation des sources de nourriture est habituellement mesurée à partir d'échantillons de sites et n'est pas couramment dérivée géospaialement. Une étude a estimé la disponibilité des proies pour l'esturgeon dans un bassin hydrographique par interpolation entre des échantillons in situ (Spindler *et al.* 2012); cependant, l'interpolation est un moyen très simplifié d'obtenir des estimations spatialement continues. De plus, de nombreux facteurs peuvent influencer sur les sources de nourriture, de sorte qu'il ne s'agit peut-être pas d'une menace qui peut être bien représentée par quelques paramètres.
5. **Changement dans le bruit** : On sait que le bruit d'origine anthropique influe sur la physiologie et le comportement de nombreux organismes aquatiques, bien que l'effet de la pollution par le bruit dans l'eau douce soit relativement sous-étudié par rapport aux systèmes marins (Risch et Parks 2017; Mickle et Higgs 2018). Un examen des effets du bruit dans l'eau douce sur les poissons a porté sur les études du bruit provenant des bateaux, de la circulation routière (le long des ponts), de la production aquacole et du chalutage. Les bruits aigus produits par des activités telles que le battage de pieux sont souvent au centre des répercussions du bruit; cependant, le bruit de la circulation des bateaux est considéré comme la pollution sonore la plus répandue dans les systèmes aquatiques et chevauche les fréquences auditives et de vocalisation de nombreux organismes aquatiques (Mickle et Higgs 2018). Les zones urbanisées peuvent également créer un bruit constant dans l'eau douce, bien que moins important que les bateaux (Kuehne *et al.* 2013). On a constaté que les environnements acoustiques sous-marins des lacs de l'État de Washington entourés d'une surface imperméable à plus de 50 % dans un rayon de 10 km dépassaient les seuils de « nuisance et de perturbation extérieures » établis par l'Environmental Protection Agency pendant la journée (Kuehne *et al.* 2013). Par conséquent, les paramètres du bruit chronique dans l'eau douce qu'on peut obtenir comprennent les traversées de ponts très fréquentées et la couverture terrestre urbaine; le trafic des bateaux est un autre paramètre important, bien que les données sur le trafic des bateaux en eau douce ne soient pas facilement disponibles.
6. **Changement dans la luminosité** : La pollution lumineuse, en particulier la lumière artificielle la nuit, peut modifier les réactions physiologiques, fonctionnelles et comportementales des organismes d'eau douce et avoir des effets écosystémiques en cascade (Hölker *et al.* 2023). La lumière directe et indirecte (le « halo lumineux ») peut avoir des effets différents selon les propriétés de la lumière en interaction avec le système d'eau douce (p. ex. atténuation, polarisation) et le biote dans le système; par exemple, la production primaire peut diminuer ou augmenter en fonction de la puissance de la lumière artificielle (Hölker *et al.* 2023). La pollution lumineuse mondiale est captée dans une certaine mesure par les satellites, mais ceux-ci ne peuvent pas détecter la lumière émise horizontalement (p. ex. par les bâtiments) ou la lumière bleue des diodes électroluminescentes (DEL), qui contribuent à une augmentation annuelle estimée à 10 % de la lumière artificielle (Falchi et Bará 2023). On pourrait utiliser les données satellitaires pour estimer partiellement cette menace pour l'eau douce en Colombie-Britannique, mais ce serait une simple association qui ne tient pas compte des différentes propriétés de la lumière et de la façon dont elle peut influencer les systèmes d'eau douce.

-
7. **Changement dans le champ électromagnétique** : Le champ géomagnétique est important pour les réactions physiologiques et comportementales de nombreuses espèces de poissons, influençant des processus tels que la migration et l'émergence des œufs (Putman *et al.* 2014, 2018; Fey *et al.* 2019). Les câbles sous-marins et les dispositifs d'énergie renouvelable en eau douce peuvent modifier les champs électromagnétiques qui peuvent avoir une incidence sur le développement des œufs et des larves (Fey *et al.* 2019), ainsi que sur le comportement de nage et la répartition (Bevelhimer *et al.* 2013). À l'heure actuelle, les renseignements spatiaux sur les câbles sous-marins ne sont pas accessibles, mais ils pourraient fournir un indicateur de la présence potentielle de cette menace.

4.5. ÉVALUATION FUTURE

L'évaluation des menaces cumulatives présentée ici fournit une base pour l'élaboration continue d'évaluations des effets cumulatifs dans l'eau douce afin de guider les mesures de gestion et les rapports sur l'état du poisson et de son habitat dans la région du Pacifique. Les prochaines étapes de cette évaluation des menaces cumulatives sont l'expansion dans d'autres parties de la région du Pacifique, la réévaluation des menaces dans quelques années pour évaluer le changement au fil du temps, l'établissement d'un lien entre l'effet des menaces sur les composantes écosystémiques focales pour l'évaluation des effets cumulatifs, et la validation des menaces et effets individuels et cumulatifs estimés.

La couverture spatiale de la région du Pacifique constitue un critère important pour la production de rapports sur l'état des menaces qui pèsent sur l'état de l'habitat du poisson. La capacité d'étendre la méthodologie à d'autres parties de la région du Pacifique dépend en grande partie de la disponibilité de l'information et des données (tableau 2). Les menaces qui sont les plus limitées pour une extension à d'autres bassins en Colombie-Britannique sont celles qui nécessitent des couches hydrologiques à une résolution de bassin hydrographique fondamental : éléments nutritifs, pollution, sédimentation, débit faible des cours d'eau et débit élevé des cours d'eau. Ces couches sont actuellement produites par le PCIC pour tous les bassins hydrographiques occupés par le saumon en Colombie-Britannique et devraient être disponibles en 2026 (M. Schnorbus, PCIC, comm. pers.). Des estimations par l'OIPABP des sources ponctuelles et diffuses sont également nécessaires pour les éléments nutritifs, la pollution et la sédimentation, et ont maintenant été élaborées pour le BFF, l'île de Vancouver, Haïda Gwaii et les bassins hydrographiques côtiers (ECCC 2022). À l'inverse, ces trois menaces peuvent être estimées à l'aide de méthodes plus simples, comme celles produites à l'origine pour la vallée du Fraser, en Colombie-Britannique (Boyd *et al.* 2022), qui pourraient ensuite être plus facilement étendues à l'ensemble de la province. Dans cette première itération, nous avons utilisé la superficie du bassin hydrologique pour tenir compte de la dilution plutôt que du débit du cours d'eau et nous avons utilisé les étendues des activités humaines et des perturbations du paysage comme substitut des contributions pour lesquelles aucune information sur la concentration des sources n'était disponible (Boyd *et al.* 2022). La méthode présentée ici est une avancée visant à fournir des estimations plus détaillées et documentées, et il serait préférable de l'utiliser plutôt que la première itération, dans la mesure du possible. Les autres menaces reposent sur des données qui sont aisément accessibles pour le reste de la Colombie-Britannique, mais leur disponibilité pour le Yukon n'a pas été évaluée ici. De plus, des modèles de température des cours d'eau ont été produits pour l'ensemble de la Colombie-Britannique (Weller *et al.* 2023), mais ils ne sont pas encore réalisables à l'aide d'une approche statistique au Yukon en raison de la disponibilité limitée des données in situ sur la température. Il faudra aussi vérifier les décisions concernant les méthodes prises pour le BFF lorsqu'on les étend à d'autres bassins; par exemple, le temps de rétablissement des zones riveraines à la suite de perturbations forestières varie selon les bassins et les climats. La

capacité d'étendre l'évaluation de chaque menace pour la région du Pacifique est décrite de manière plus détaillée dans le tableau 2.

À l'avenir, il sera possible de réévaluer les menaces dans le temps, en utilisant les cotes de menace fournies ici comme base de référence. Les couches de données pour lesquelles des séries chronologiques sont disponibles et qui permettraient d'effectuer des évaluations rétrospectives ou futures portaient sur la couverture terrestre et l'utilisation des terres, ainsi que les couches sur les forêts pour les feux, les blocs de coupe et la défoliation par les ravageurs. Ces couches de données contribuent aux menaces de la destruction de l'habitat dans les cours d'eau, de la fragmentation latitudinale, de la perturbation du milieu riverain, des éléments nutritifs, de la pollution et de la sédimentation. Bon nombre des autres couches de données sont mises à jour régulièrement, mais elles ne sont souvent pas associées à des horodatages selon le moment où elles ont été élaborées, de sorte qu'une analyse rétrospective n'est pas possible (annexe C, tableau C1). Cependant, les menaces pourront être réévaluées dans le futur à l'aide de couches de données mises à jour (avec la mise en garde selon laquelle les nouveaux ajouts aux ensembles de données pourraient également être dus à des développements précédemment manquants qui ne sont pas nouveaux dans le paysage). Une exception concerne les intrants de sources ponctuelles pour les éléments nutritifs et la pollution qui ont été extraits directement de l'OIPABP (ECCC 2022); des évaluations mises à jour nécessiteraient des mises à jour de l'OIPABP ou l'établissement d'un lien entre ces estimations et les changements dans les activités humaines connexes (p. ex. mines, transformation des fruits de mer, déchets de bois). Nous avons également utilisé les couches de données intégrées des routes et de l'exploitation minière du [BC Cumulative Effects Framework](#) réalisées en 2022 pour notre évaluation, car elles ont combiné et éliminé le dédoublement de multiples ensembles de données routières (atlas numérique des routes, routes forestières et routes de l'industrie pétrolière et gazière), et assemblé divers types de mines à partir de deux sources de données. Les sources de données originales pour les routes sont mises à jour et pourraient être utilisées à l'avenir si les données du BC Cumulative Effects Framework ne sont pas actualisées, mais il faudra peut-être utiliser d'autres sources pour l'exploitation minière, car elles ne semblent pas à jour.

Pour étendre la cote des menaces cumulatives établie ici à une cote des effets cumulatifs, il faut de l'information sur l'incidence relative de chaque menace sur la composante écosystémique focale. Les cotes de menace peuvent être pondérées en fonction de l'opinion d'experts sur la vulnérabilité de la composante écosystémique à chaque menace (Halpern *et al.* 2008b; Vörösmarty *et al.* 2010). Une approche plus affinée consisterait à utiliser des courbes de réponse aux agents de stress qui délimitent les réponses non linéaires des composantes écosystémiques focales pour une gamme de niveaux de menace (Rosenfeld *et al.* 2022; MacPherson *et al.* 2024). Les courbes de réponse aux agents de stress sont habituellement générées par des expériences, des études sur le terrain et des relations modélisées, bien que des méthodes permettant de dériver ces relations à partir d'avis d'experts aient également été élaborées (MPO 2019b; MacPherson *et al.* 2024). Nous avons cherché à créer des cotes de menace qui favoriseraient l'élaboration d'une courbe de réponse aux agents de stress en estimant les menaces qui touchent directement le poisson et son habitat, dans la mesure du possible. Par exemple, établir un lien entre les réponses des écosystèmes des cours d'eau et les intrants d'éléments nutritifs d'origine humaine est plus significatif que de lier les réponses à la proportion de l'agriculture dans un bassin hydrographique, un exercice de cartographie qui est plus facile à réaliser, mais qui constitue une étape supplémentaire. Pour élaborer les valeurs estimées des charges en polluants dans les cotes d'effet pour le poisson, il faudra attribuer des cotes distinctes pour les divers polluants, car l'ampleur de leurs effets sur le poisson varie selon leur type et leur concentration.

La validation est une étape importante de la plupart des exercices de modélisation, bien qu'elle ne soit souvent pas une composante standard des évaluations des effets cumulatifs (Halpern et Fujita 2013). Il est possible de valider les estimations des menaces et la réponse prévue de la composante écosystémique focale. Il est moins nécessaire de valider les menaces dérivées de l'imagerie satellitaire ou des ensembles de données sur l'empreinte de l'utilisation des terres, comme la perturbation du milieu riverain, à moins que les sources de données ne soient pas fiables. À l'inverse, il serait utile de valider les menaces qui concernent des relations et des estimations appliquées, comme les menaces accumulées par le débit. Par exemple, ECCC (2022) a effectué une analyse de la charge en contaminants aux stations de surveillance de l'eau du BFF et comparé les charges obtenues aux rejets estimés. Ces scientifiques ont remarqué que de nombreux polluants (p. ex. métaux, BPC, HAP) étaient plus importants dans l'analyse de la charge en contaminants que dans les rejets estimés, et ont expliqué cette constatation en partie par les sources manquantes, comme les rejets des sédiments et les dépôts atmosphériques (ECCC 2022). Nos estimations de la pollution sont donc probablement sous-évaluées dans la même mesure puisque nous avons utilisé les rejets estimatifs d'ECCC. La pollution pourrait ainsi jouer un rôle plus important dans la cote des menaces cumulatives que celui qui apparaît actuellement. Dans un autre cas, les comparaisons des indicateurs des pressions anthropiques dérivés du PSE avec l'abondance des saumons reproducteurs ont révélé des relations faibles et variables (Peacock *et al.* 2023). À l'inverse, nous avons trouvé des preuves d'homogénéisation biotique de la diversité des poissons d'eau douce à partir des pressions cumulatives dans le BFF fondées sur des relations modélisées entre les compositions des espèces de poissons dans les bassins hydrographiques d'évaluation d'eau douce et les mêmes indicateurs de pression (Iacarella 2022). La complexité de l'exposition des populations de saumons aux conditions de l'habitat d'eau douce peut mener à des relations faibles, alors que les communautés de poissons (composées principalement d'espèces résidentes) évaluées à l'échelle du paysage correspondant semblent plus étroitement liées aux pressions humaines, ce qui souligne l'importance de faire correspondre les caractéristiques biologiques et l'échelle dans les résultats attendus de la validation.

À ce stade-ci de l'évaluation, les cotes des menaces individuelles et cumulatives présentées ici fournissent des renseignements utiles sur l'exposition estimée à la menace pour le poisson et son habitat à haute résolution et dans une grande partie de la Colombie-Britannique. Ces renseignements peuvent être utiles pour cibler les zones pour des évaluations plus approfondies sur le terrain, produire des rapports sur l'état des menaces pesant sur l'état du poisson et de son habitat, établir les priorités et les cadres décisionnels, ainsi que planifier la gestion et la restauration.

5. REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier les nombreuses personnes qui nous ont fourni des données et en ont discuté avec nous pour notre utilisation, de même que pour les entretiens qui ont aidé à orienter ce travail depuis son début en 2021, notamment : Shane Byrne (ministère de l'Intendance de l'eau, des terres et des ressources), Hailey Eckstrand (Foundry Spatial), Paul Grant (MPO), Monica Hilborn (Environnement et Changement climatique Canada), Nick Mazany-Wright (Fédération canadienne de la faune), Cathryn Murray (MPO), Simon Norris (Hillcrest Geographics), Stephanie Peacock (Fondation du saumon du Pacifique), Monica Pearson (ministère de l'Eau, des Terres et des Ressources), Marc Porter (Fondation du saumon du Pacifique) et Markus Schnorbus (PCIC). Nous remercions tout particulièrement Lindsey Boyd (Environnement et Changement climatique Canada, autrefois employée du MPO), qui a travaillé à la collecte de données, à l'élaboration de méthodes et à l'évaluation des menaces pour la première phase de ce projet. Nous aimerions également remercier le Comité directeur pour ses

commentaires sur le projet et ses idées pour les applications de gestion : Thomas Appleby, Kristin Gravelle, Emma Hodgson, Jeffrey Lemieux, Sean Naman, David Patterson et David Semeniuk. Merci à Patrimoine naturel pour sa subvention.

6. RÉFÉRENCES CITÉES

- Abdul-Aziz, O.I., and Gebreslase, A.K. 2023. Emergent scaling of dissolved oxygen (DO) in freshwater streams across contiguous USA. *Water Resour. Res.* 59: e2022WR032114.
- Beechie, T.J., Pess, G., Kennard, P., Bilby, R.E., and Bolton, S. 2000. Modeling recovery rates and pathways for woody debris recruitment in Northwestern Washington streams. *North Am. J. Fish. Manag.* 20: 436–452.
- Bevelhimer, M.S., Cada, G.F., Fortner, A.M., Schweizer, P.E., and Riemer, K. 2013. Behavioral responses of representative freshwater fish species to electromagnetic fields. *Trans. Am. Fish. Soc.* 142: 802–813.
- Beyene, M.T., Leibowitz, S.G., Snyder, M., Ebersole, J.L., and Almquist, V.W. 2022. Variable wildfire impacts on the seasonal water temperatures of western US streams: A retrospective study. *PLoS One*. 17: e0268452.
- Boyd, L., Grant, P., Lemieux, J., and Iacarella, J.C. 2022. [Cumulative Effects of Threats on At-Risk Species Habitat in the Fraser Valley, British Columbia](#). *Can. Manuscr. Rep. Fish. Aquat. Sci.* 3243: viii + 65 p.
- Braga, R.R., Gómez-Aparicio, L., Heger, T., Vitule, J.R.S., and Jeschke, J.M. 2018. Structuring evidence for invasional meltdown: broad support but with biases and gaps. *Biol. Invas.* 20: 923–936.
- Brice, R.L., Coulthard, B., Homfeld, I., Dye, L., and Anchukaitis, K. 2021. Paleohydrological context for recent floods and droughts in the Fraser River Basin, British Columbia, Canada. *Environ. Res. Lett.* 16: 124074.
- Brown, T.G. 2002. [Floodplains, flooding and salmon rearing habitats in British Columbia: A review](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2002/007. 155 p.
- Coble, A.A., Barnard, H., Du, E., Johnson, S., Jones, J., Keppeler, E., Kwon, H., Link, T.E., Penaluna, B.E., Reiter, M., River, M., Puettmann, K., and Wagenbrenner, J. 2020. Long-term hydrological response to forest harvest during seasonal low flow: Potential implications for current forest practices. *Sci. Total Environ.* 730: 138926.
- Commissaire à l'environnement et au développement durable. 2019. [Printemps 2019 — Rapports de la commissaire à l'environnement et au développement durable](#). Bureau du vérificateur général du Canada.
- Coogan, S.C.P., Robinne, F.-N., Jain, P., and Flannigan, M.D. 2019. Scientists' warning on wildfire – a Canadian perspective. *Can. J. Forest Res.* 49: 1015–1023.
- Craig, J.R., Brown, G., Chlumsky, R., Jenkinson, R.W., Jost, G., Lee, K., Mai, J., Serrer, M., Sgro, N., Shafii, M., Snowdon, A.P., and Tolson, B.A. 2020. Flexible watershed simulation with the Raven hydrological modelling framework. *Environ. Model. Softw.* 129: 104728.
- Crain, C.M., Kroeker, K., and Halpern, B.S. 2008. Interactive and cumulative effects of multiple human stressors in marine systems. *Ecol. Lett.* 11: 1304–1315.
- Crooks, J.A. 2005. Lag times and exotic species: the ecology and management of biological invasions in slow-motion. *Ecoscience*. 12: 316–329.

-
- Crozier, L.G., Burke, B.J., Chasco, B.E., Widener, D.L., and Zabel, R.W. 2021. Climate change threatens Chinook salmon throughout their life cycle. *Communications Biol.* 4: 222.
- de Kerckhove, D.T., Minns, C.K., and Chu, C. 2015. Estimating fish exploitation and aquatic habitat loss across diffuse inland recreational fisheries. *PLoS One.* 10: e0121895.
- Déry, S.J., Hernández-Henríquez, M.A., Owens, P.N., Parkes, M.,W., and Petticrew, E.L. 2012. A century of hydrological variability and trends in the Fraser River Basin. *Environ. Res. Lett.* 7: 024019.
- Dey, C.J., and Koops, M.A. 2021. The consequences of null model selection for predicting mortality from multiple stressors. *Proc. Royal Soc. B.* 288: 20203126.
- Dey, C.J., Matchett, S., Doolittle, A., Jung, J., Kavanagh, R., Sobowale, R., Schwartz, T., et Chu, C. 2023. [Évaluation préliminaire de l'état du poisson et de son habitat dans la région de l'Ontario et des Prairies de Pêches et Océans Canada](#). Secr. can. des avis sci. du MPO. Doc. de rech. 2023/054. v + 77 p.
- DFO. 1998. Fraser River Salmon Summary. Vancouver, BC.
- Donahue, W.F. 2013. Determining appropriate nutrient and sediment loading coefficients for modeling effects of changes in landuse and landcover in Alberta Watersheds (technical report). Water Matters Society of Alberta, Canmore, AB.
- Environment and Climate Change Canada (ECCC). 2022. Pollutants Affecting Whales and their Prey Inventory Tool (PAWPIT): Development of an inventory of contaminants of concern for Resident Killer Whales and Chinook Salmon. Environment and Climate Change Canada.
- Ministry of Forests, Lands, Natural Resource Operations and Rural Development (FLNRORD). 2022. Environmental Flow Needs Policy.
- Falchi, F., and Bará, S. 2023. Light pollution is skyrocketing. *Science.* 379: 234–235.
- Ferencz, S.B., Cardenas, M.B., and Neilson, B.T. 2019. Analysis of the effects of dam release properties and ambient groundwater flow on surface water-groundwater exchange over a 100-km-long reach. *Water Resour. Res.* 55: 8526–8546.
- Fey, D.P., Jakubowska, M., Greszkiewicz, M., Andrulewicz, E., Otremba, Z., and Urban-Malinga, B. 2019. Are magnetic and electromagnetic fields of anthropogenic origin potential threats to early life stages of fish? *Aquat. Toxicol.* 209: 150–158.
- Gallardo, B., Clavero, M., Sánchez, M.I., and Vilà, M. 2016. Global ecological impacts of invasive species in aquatic ecosystems. *Global Change Biol.* 22: 151–163.
- GeoBC. 2011. [Freshwater Atlas Stream Network](#). Government of British Columbia.
- Goeking, S.A., and Tarboton, D.G. 2020. Forests and water yield: A synthesis of disturbance effects on streamflow and snowpack in Western coniferous forests. *J. Forestry.* 118: 172–192.
- GeoBC. 2011. [Freshwater Atlas Stream Network](#). Government of British Columbia.
- Goeking, S.A., and Tarboton, D.G. 2020. Forests and water yield: A synthesis of disturbance effects on streamflow and snowpack in Western coniferous forests. *J. Forestry.* 118: 172–192.
- Graf, W.L. 2006. Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers. *Geomorphology.* 79: 336–360.

-
- Hague, M.J., and Patterson, D.A. 2014. Evaluation of statistical river temperature forecast models for fisheries management. *North Am. J. Fish. Manage.* 34: 132–146.
- Halpern, B.S., Frazier, M., Potapenko, J., Casey, K.S., Koenig, K., Longo, C., Lowndes, J.S., Rockwood, R.C., Selig, E.R., Selkoe, K.A., and Walbridge, S. 2015. Spatial and temporal changes in cumulative human impacts on the world's ocean. *Nature Communications*. 6: 7615.
- Halpern, B.S., and Fujita, R. 2013. Assumptions, challenges, and future directions in cumulative impact analysis. *Ecosphere*. 4: art131.
- Halpern, B.S., McLeod, K.L., Rosenberg, A.A., and Crowder, L.B. 2008a. Managing for cumulative impacts in ecosystem-based management through ocean zoning. *Ocean Coast. Manage.* 51: 203–211.
- Halpern, B.S., Walbridge, S., Selkoe, K.A., Kappel, C.V., Micheli, F., D'Agrosa, C., Bruno, J.F., Casey, K.S., Ebert, C., Fox, H.E., Fujita, R., Heinemann, D., Lenihan, H.S., Madin, E.M.P., Perry, M.T., Selig, E.R., Spalding, M., Steneck, R., and Watson, R. 2008b. A global map of human impact on marine ecosystems. *Science*. 319: 948–952.
- Hélie, J.F., Peters, D.L., Tattree, K.R., et Gibson, J.J. 2005. [Review and synthesis of potential hydrologic impacts of Mountain Pine Beetle and related harvesting activities in British Columbia](#). Ressources naturelles Canada.
- Hölker, F., Jechow, A., Schroer, S., Tockner, K., and Gessner, M.O. 2023. Light pollution of freshwater ecosystems: principles, ecological impacts and remedies. *Philosophical Trans. Royal Soc. B: Biol. Sci.* 378: 20220360.
- Iacarella, J.C. 2022. Fish zeta diversity responses to human pressures and cumulative effects across a freshwater basin. *Diversity Distrib.* 28: 830–843.
- Iacarella, J.C., Chea, R., Patterson, D.A., and Weller, J.D. 2024. [Projecting exceedance of juvenile thermal maxima in streams under climate change: A crosswalk from lab experiments to riparian restoration](#). *Freshw. Biol.* 69: 1218–1231.
- Iacarella, J.C., and Weller, J.D. 2023. Predicting favourable streams for anadromous salmon spawning and natal rearing under climate change. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 81: 1–13.
- Isaak, D.J., Luce, C.H., Horan, D.L., Chandler, G.L., Wollrab, S.P., Dubois, W.B., and Nagel, D.E. 2020. Thermal regimes of perennial rivers and streams in the Western United States. *J. Am. Water Resource. Assoc.* 56: 842–867.
- Isaak, D.J., Luce, C.H., Horan, D.L., Chandler, G.L., Wollrab, S.P., and Nagel, D.E. 2018. Global warming of salmon and trout rivers in the Northwestern U.S.: Road to ruin or path through purgatory? *Trans. Am. Fish. Soc.* 147: 566–587.
- Isaak, D.J., Wenger, S.J., Peterson, E.E., Ver Hoef, J.M., Hostetler, S.W., Luce, C.H., Dunham, J.B., Kershner, J.L., Roper, B.B., Nagel, D.E., Chandler, G.L., Wollrab, S.P., Parkes, S.L., and Horan, D.L. 2016. NorWeST modeled summer stream temperature scenarios for the western U.S. Forest Service Research Data Archive, Fort Collins, CO.
- Isaak, D.J., Wenger, S.J., Peterson, E.E., Ver Hoef, J.M., Nagel, D.E., Luce, C.H., Hostetler, S.W., Dunham, J.B., Roper, B.B., Wollrab, S.P., Chandler, G.L., Horan, D.L., and Parkes-Payne, S. 2017. The NorWeST summer stream temperature model and scenarios for the Western U.S.: A crowd-sourced database and new geospatial tools foster a user community and predict broad climate warming of rivers and streams. *Water Resource. Res.* 53: 9181–9205.
-

-
- Isaak, D.J., and Young, M.K. 2023. Cold-water habitats, climate refugia, and their utility for conserving salmonid fishes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 80: 1187–1206.
- Islam, S.U., Déry, S.J., and Werner, A.T. 2017. Future climate change impacts on snow and water resources of the Fraser River Basin, British Columbia. *J. Hydrometeorology*. 18: 473–496.
- Jensen, D.W., Steel, E.A., Fullerton, A.H., and Pess, G.R. 2009. Impact of fine sediment on egg-to-fry survival of Pacific salmon: A meta-analysis of published studies. *Rev. Fish. Sci.* 17: 348–359.
- Jewett, K., Daugharty, D., Krause, H.H., and Arp, P.A. 1995. Watershed responses to clear-cutting: Effects on soil solutions and stream water discharge in central New Brunswick. *Can. J. Soil Sci.* 75: 475–490.
- Johnson, D.W., Susfalk, R.B., and Dahlgren, R.A. 1997. Nutrient fluxes in forests of eastern Sierra Nevada Mountains, United States of America. *Global Biogeochem. Cycles*. 11: 673–681.
- Kuehne, L.M., Padgham, B.L., and Olden, J.D. 2013. The soundscapes of lakes across an urbanization gradient. *Plos One*. 8: e55661.
- Linke, S., Lehner, B., Ouellet Dallaire, C., Ariwi, J., Grill, G., Anand, M., Beames, P., Burchard-Levine, V., Maxwell, S., Moidu, H., Tan, F., and Thieme, M. 2019. Global hydro-environmental sub-basin and river reach characteristics at high spatial resolution. *Sci. Data*. 6: 283.
- MacPherson, L.M., Reilly, J.R., Neufeld, K.R., Sullivan, M.G., Paul, A.J., and Johnston, F.D. 2024. Prioritizing bull trout recovery actions using a novel cumulative effects modelling framework. *Fish. Manage. Ecol.* 31: e12649.
- McCormick, D.P., and Harrison, S.S.C. 2011. Direct and indirect effects of riparian canopy on juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar*, and brown trout, *Salmo trutta*, in south-west Ireland. *Fish. Manage. Ecol.* 18: 444–455.
- Merrill, M.A. 2005. The effects of culverts and bridges on stream geomorphology. MSc. North Carolina State University, Raleigh, North Carolina.
- Mickle, M.F., and Higgs, D.M. 2018. Integrating techniques: a review of the effects of anthropogenic noise on freshwater fish. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 75: 1534–1541.
- Miller, J.W., Kocovsky, P.M., Wiegmann, D., and Miner, J.G. 2018. Fish community responses to submerged aquatic vegetation in Maumee Bay, Western Lake Erie. *North American J. Fish. Manage.* 38: 623–629.
- Ministry of Forests, Lands and Natural Resource Operations. 2016. Riparian Areas Regulation Guidebook For Waterfront Home Owners and Property Developers. Version 3.0.
- Mohanty, M.P., and Simonovic, S.P. 2021. Changes in floodplain regimes over Canada due to climate change impacts: Observations from CMIP6 models. *Sci. Total Environ.* 792: 148323.
- Mote, P.W., Parson, E.A., Hamlet, A.F., Keeton, W.S., Lettenmaier, D., Mantua, N., Miles, E.L., Peterson, D.W., Peterson, D.L., Slaughter, R., and Snover, A.K. 2003. Preparing for climatic change: The water, salmon, and forests of the Pacific Northwest. *Clim. Change*. 61: 45–88.
- Mount, C. 2017. An update on the Fish Passage file in BC. International Conference on Engineering and Ecohydrology for Fish Passage.
-

-
- Mount, C. 2017. An update on the Fish Passage file in BC. International Conference on Engineering and Ecohydrology for Fish Passage.
- MPO. 2019a. [Énoncé de politique sur la protection du poisson et de son habitat, août 2019](#).
- MPO. 2019b. [Examen du modèle de Joe d'évaluation des effets cumulatifs du ministère de l'environnement et des Parcs de L'Alberta](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2019/045.
- MPO. 2020. [Lignes directrices sur la désignation de l'habitat essentiel dans la zone riveraine des espèces d'eau douce en péril](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2020/040.
- MPO. 2022. [Outils de cartographie géospatiale, indicateurs et mesures pour l'état du poisson et de son habitat dans la région du Pacifique](#). Secr. can. des avis sci. du MPO. Rép. des Sci. 2022/047.
- Murray, C., Hannah, L., and Locke, A. 2020. [A Review of Cumulative Effects Research and Assessment in Fisheries and Oceans Canada](#). Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 3357: vii + 51 p.
- Nasirzadehdizaji, R., and Akyuz, D.E. 2022. Predicting the potential impact of forest fires on runoff and sediment loads using a distributed hydrological modeling approach. *Ecol. Model.* 468: 109959.
- Nener, J.C., and Wernick, B.G. 1997. Fraser River Basin Strategic Water Quality Plan, Lower Fraser River: Fraser Delta, Pitt-Stave, Chilliwack and Harrison-Lillooet Habitat Management Areas. Fisheries and Oceans Canada.
- Orr, J.A., Vinebrooke, R.D., Jackson, M.C., Kroeker, K.J., Kordas, R.L., Mantyka-Pringle, C., Van den Brink, P.J., De Laender, F., Stoks, R., Holmstrup, M., Matthaei, C.D., Monk, W.A., Penk, M.R., Leuzinger, S., Schäfer, R.B., and Piggott, J.J. 2020. Towards a unified study of multiple stressors: divisions and common goals across research disciplines. *Proc. Royal Soc. B: Biol. Sci.* 287: 20200421.
- Palviainen, M., Finér, L., Laurén, A., Mattsson, T., and Högbom, L. 2015. A method to estimate the impact of clear-cutting on nutrient concentrations in boreal headwater streams. *Ambio.* 44: 521–531.
- Patterson, D.A., Robinson, K.A., Raby, G.D., Bass, A.L., Houtman, R., Hinch, S.G., and Cooke, S.J. 2017. [Guidance to Derive and Update Fishing-Related Incidental Mortality Rates for Pacific salmon](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2017/011. vii + 56 p.
- Peacock, S.J., Braun, D.C., Hodgson, E.E., Connors, B.M., Bryan, K., and Connors, K. 2023. Testing for broad-scale relationships between freshwater habitat pressure indicators and Pacific salmon population trends. *Ecol. Indicators.* 147: 109935.
- Pitman, K.J., Moore, J.W., Sloat, M.R., Beaudreau, A.H., Bidlack, A.L., Brenner, R.E., Hood, E.W., Pess, G.R., Mantua, N.J., Milner, A.M., Radić, V., Reeves, G.H., Schindler, D.E., and Whited, D.C. 2020. Glacier retreat and Pacific salmon. *Bioscience.* 70: 220–236.
- Post, J.R., Mandrak, N., and Burridge, M. 2015. Canadian freshwater fishes, fisheries and their management, south of 60°N. *Freshw. Fish. Ecol. J.F. Craig (Ed.)*. Pages 151–165.
- Provincial Aquatic Ecosystems Technical Working Group. 2020. Interim assessment protocol for aquatic ecosystems in British Columbia – Standards for assessing the condition of aquatic ecosystems under British Columbia's cumulative effects framework. Version 1.3. Ministry of Environment and Climate Change Strategy and Ministry of Forests, Lands and Natural Resource Operations and Rural Development.
-

-
- Pacific Salmon Foundation (PSF). 2021. Methods for assessing status and trends in Pacific salmon Conservation Units and their freshwater habitats. Vancouver, BC, Canada.
- Ptolemy, R., and Lewis, A. 2002. Rationale for multiple British Columbia instream flow standards to maintain ecosystem function and biodiversity. British Columbia Ministry of Water, Land, and Air Protection and Ministry of Sustainable Resource Management.
- Pureswaran, D.S., Roques, A., and Battisti, A. 2018. Forest insects and climate change. *Current Forest. Rep.* 4: 35–50.
- Putman, N.F., Jenkins, E.S., Michielsens, C.G.J., and Noakes, D.L.G. 2014. Geomagnetic imprinting predicts spatio-temporal variation in homing migration of pink and sockeye salmon. *J. Royal Soc. Interface.* 11: 20140542.
- Putman, N.F., Scanlan, M.M., Pollock, A.M., O'Neil, J.P., Couture, R.B., Stoner, J.S., Quinn, T.P., Lohmann, K.J., and Noakes, D.L.G. 2018. Geomagnetic field influences upward movement of young Chinook salmon emerging from nests. *Biol. Lett.* 14: 20170752.
- Python Software Foundation. 2023. Python Language Reference, version 3.12.
- Quinn, T.P., Wilhere, G.F., and Krueger, K.L. 2020. Riparian Ecosystems, Volume 1: Science Synthesis and Management Implications. Habitat Program, Washington Department of Fish and Wildlife, Olympia, Washington.
- R Development Core Team. 2022. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Rebellato, B.D., Norris, S.N., Bailey, R.E., Mazany-Wright, N., Mount, C., and Lapointe, N.W.R. 2022. Impact of rail crossings on passage of Pacific salmon and steelhead in the Fraser River basin. Canadian Wildlife Federation Technical Report.
- Riley, W.D., Pawson, M.G., Quayle, V., and Ives, M.J. 2009. The effects of stream canopy management on macroinvertebrate communities and juvenile salmonid production in a chalk stream. *Fish. Manage. Ecol.* 16: 100–111.
- Risch, D., and Parks, S.E. 2017. Biodiversity assessment and environmental monitoring in freshwater and marine biomes using ecoacoustics. *In: Ecoacoustics.* A. Farina and S.H. Gage (Eds.). Pages 145–168.
- Rosenau, M.L., and Angelo, M. 2000. Sand and gravel management and fish-habitat protection in British Columbia Salmon and Steelhead streams. Pacific Fisheries Resource Conservation Council.
- Rosenfeld, J., Gonzalez-Espinosa, P., Jarvis, L., Enders, E., Bayly, M., Paul, A., MacPherson, L., Moore, J., Sullivan, M., Ulaski, M., and Wilson, K. 2022. Stressor-response functions as a generalizable model for context dependence. *Trends Ecol. Evolut.* 37: 1032–1035.
- Rosenfeld, J., Pearson, M.P., Miners, J., and Zinn, K. 2021. Effects of landscape-scale hypoxia on Salish sucker and salmonid habitat associations: implications for endangered species recovery and management1. *Can. J. Fish. Aquatic. Sci.* 78: 1219–1233.
- Ross, P.S., Kennedy, C.J., Shelley, L.K., Tierney, K.B., Patterson, D.A., Fairchild, W.L., and Macdonald, R.W. 2013. The trouble with salmon: relating pollutant exposure to toxic effect in species with transformational life histories and lengthy migrations. *Can. J. Fish. Aquatic. Sci.* 70: 1252–1264.
- Rowan, G.S.L., and Kalacska, M. 2021. A review of remote sensing of submerged aquatic vegetation for non-specialists. *Remote Sens.* 13: 623.

-
- Schäfer, R.B., and Piggott, J.J. 2018. Advancing understanding and prediction in multiple stressor research through a mechanistic basis for null models. *Global Change Biol.* 24:1 817–1826.
- Schnorbus, M.A. 2020. VIC Glacier (VIC-GL) – Model Set-up and Deployment for the Peace, Fraser, and Columbia. Pacific Climate Impacts Consortium, University of Victoria, Victoria, BC.
- Seixas, G.B., Beechie, T.J., Fogel, C., and Kiffney, P.M. 2018. Historical and future stream temperature change predicted by a Lidar-based assessment of riparian condition and channel width. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 54: 974–991.
- Sergeant, C.J., Bellmore, J.R., Bellmore, R.A., Falke, J.A., Mueter, F.J., and Westley, P.A.H. 2023. Hypoxia vulnerability in the salmon watersheds of Southeast Alaska. *Sci. Total Environ.* 896: 165247.
- Silins, U., Bladon, K.D., Kelly, E.N., Esch, E., Spence, J.R., Stone, M., Emelko, M.B., Boon, S., Wagner, M.J., Williams, C.H.S., and Tichowsky, I. 2014. Five-year legacy of wildfire and salvage logging impacts on nutrient runoff and aquatic plant, invertebrate, and fish productivity. *Ecohydrology.* 7: 1508–1523.
- Simberloff, D., and Von Holle, B. 1999. Positive interactions of nonindigenous species: invasional meltdown? *Biol. Invasions.* 1: 21–32.
- Simonovic, S.P., Mohanti, M., and Schardong, A. 2023. Web-based tool for visualizing changes in floodplain regimes over Canada due to climate change – ver 2.0. Western University Facility for Intelligent Decision Support, open access.
- Spindler, B.D., Chipps, S.R., Klumb, R.A., Graeb, B.D.S., and Wimberly, M.C. 2012. Habitat and prey availability attributes associated with juvenile and early adult pallid sturgeon occurrence in the Missouri River, USA. *Endang. Species Res.* 16: 225–234.
- Tennant, D.L. 1976. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation, and related environmental resources. *Fisheries.* 1: 6–10.
- van Rensen, C., Neumann, N., and Young, V. 2020. A GIS indicator-based protocol for assessing cumulative watershed effects: Procedures adapted for the Kootenay Boundary Region. British Columbia Ministry of Forests, Lands, Natural Resource Operations and Rural Development – Kootenay Boundary Region.
- Vörösmarty, C.J., McIntyre, P.B., Gessner, M.O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S.E., Sullivan, C.A., Liermann, C.R., and Davies, P.M. 2010. Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature.* 467: 555–561.
- Wanders, N., van Vliet, M.T.H., Wada, Y., Bierkens, M.F.P., and van Beek, L.P.H. 2019. High-resolution global water temperature modeling. *Water Resour. Res.* 55: 2760–2778.
- Weller, J.D., Moore, R.D., and Iacarella, J.C. 2023. Stream thermalscape scenarios for British Columbia, Canada. *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques.* 1–20.
- Zhang, X., Liu, X., Zhang, M., Dahlgren, R.A., and Eitzel, M. 2010. A Review of vegetated buffers and a meta-analysis of their mitigation efficacy in reducing nonpoint source pollution. *J. Environ. Quality.* 39: 76–84.

ANNEXE A. UNITÉS D'ÉVALUATION

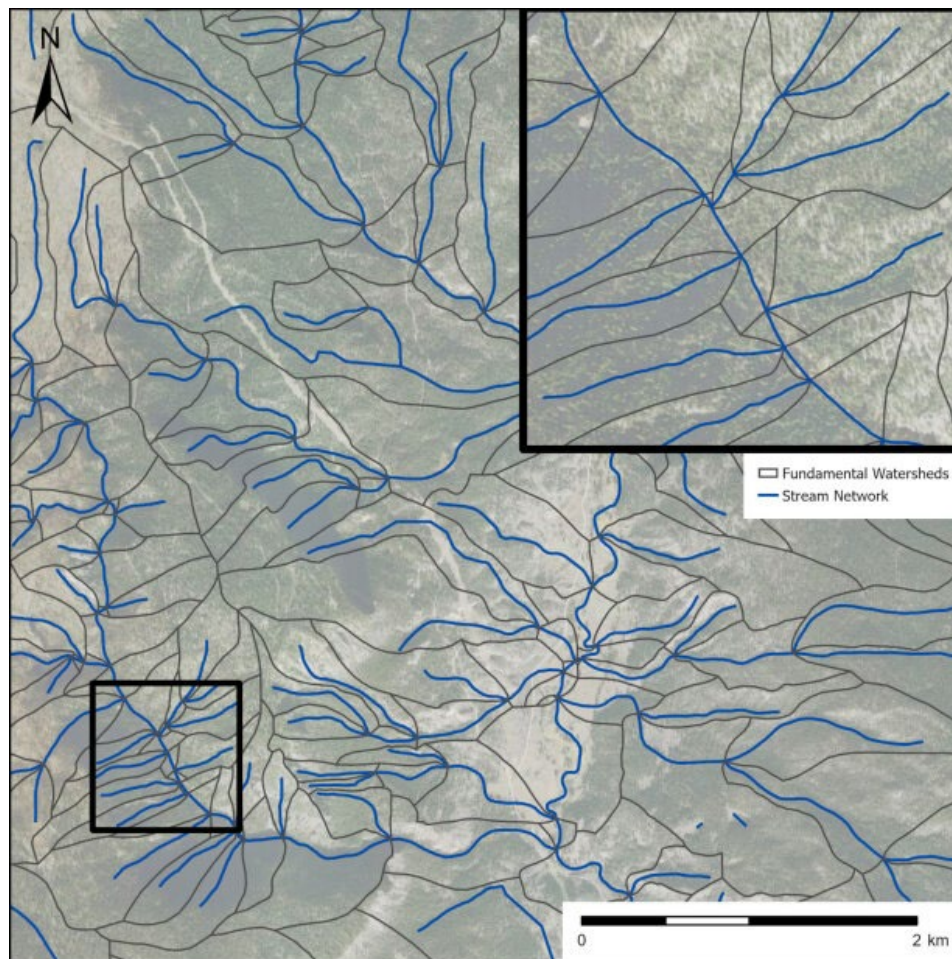


Figure A1. Exemple de réseau de cours d'eau et des bassins hydrographiques fondamentaux connexes du FWA utilisés pour évaluer les menaces.

Tableau A1. Codes et nom des groupes de bassins hydrographiques du FWA.

Code	Nom	Code	Nom
ADMS	Rivière Adams	LSAL	Cours inférieur de la rivière Salmon
BBAR	Ruisseau Big Bar	LTRE	Partie inférieure du lac Trembleur
BIGC	Ruisseau Big	MAHD	Lac Mahood
BLAR	Rivière Blackwater	MCGR	Rivière McGregor
BONP	Rivière Bonaparte	MFRA	Moyen Fraser
BOWR	Bowron	MIDR	Rivière Middle
BRID	Ruisseau Bridge	MORK	Rivière Morkill
CARR	Rivière Cariboo	MURT	Lac Murtle
CHES	Rivière Cheslatta	MUSK	Rivière Muskeg
CHIL	Rivière Chilako	NARC	Ruisseau Narcosli
CHIR	Rivière Chilko	NAZR	Rivière Nazko
CHWK	Rivière Chilliwack	NECR	Rivière Nechako
CLWR	Rivière Clearwater	NICL	Rivière Nicola
COTR	Rivière Cottonwood	QUES	Rivière Quesnel
DEAD	Rivière Deadman	SAJR	Rivière San Jose
DOGC	Ruisseau Dog	SALR	Rivière Salmon
DRIR	Rivière Driftwood	SETN	Lac Seton
EUCH	Rivière Euchiniko	SHUL	Lac Shuswap
EUCL	Lac Euchiniko	STHM	Rivière South Thompson
FRAN	Lac François	STUL	Lac Stuart
FRCN	Canyon du Fraser	STUR	Rivière Stuart
GRNL	Lac Green	TABR	Rivière Tabor
GUIC	Ruisseau Guichon	TAKL	Lac Takla
HARR	Rivière Harrison	TASR	Rivière Taseko
HERR	Ruisseau Herrick	THOM	Rivière Thompson
HORS	Rivière Horsefly	TWAC	Ruisseau Twan
LCHL	Cours inférieur de la rivière Chilako	UCHR	Cours supérieur de la rivière Chilcotin
LCHR	Cours inférieur de la rivière Chilcotin	UEUT	Partie supérieure du lac Eutsuk
LEUT	Partie inférieure du lac Eutsuk	UFRA	Haut Fraser
LFRA	Bas Fraser	UNRS	Partie supérieure du réservoir Nechako
LILL	Lillooet	UNTH	Cours supérieur de la rivière North Thompson
LNIC	Cours inférieur de la rivière Nicola	USHU	Cours supérieur de la rivière Shuswap
LNRS	Partie inférieure du réservoir Nechako	UTRE	Partie supérieure du lac Trembleur
LNTH	Cours inférieur de la rivière North Thompson	WILL	Rivière Willow

ANNEXE B. UNITÉS DÉSIGNABLES DES ESPÈCES EN PÉRIL ET DU SAUMON

Tableau B1. Espèces de poissons en péril et unités de conservation (UC) du saumon préoccupantes, menacées ou en voie de disparition ayant des habitats importants dans le bassin du fleuve Fraser. L'information provient des rapports du COSEPAC; les menaces catégorisées sont celles qui ont été expressément déterminées pour une population, mais elles ne sont pas considérées comme étant exhaustives ou exclusives à cette population.

Espèce	Population	Statut selon le COSEPAC	Menaces environnementales catégorisées pour l'eau douce
Ombre à tête plate	Côte sud de la Colombie-Britannique	Espèce préoccupante	<ul style="list-style-type: none"> • Espèces aquatiques envahissantes • Pêche (prises accessoires) • Dégradation de l'habitat
Chabot de la chaîne côtière	Lac Cultus	En voie de disparition	<ul style="list-style-type: none"> • Espèces aquatiques envahissantes • Changements du régime de débit – débit faible (changements climatiques) • Changements de la température – température chaude (changements climatiques) • Pollution
Esturgeon vert	Toutes	Espèce préoccupante	<ul style="list-style-type: none"> • Pêche (prises accessoires) • Modification du débit • Pollution • Sédimentation
Meunier de montagne	Pacifique	Espèce préoccupante	<ul style="list-style-type: none"> • Espèces aquatiques envahissantes • Changements du régime de débit – débit faible (changements climatiques) • Changements de la température – température chaude (changements climatiques) • Modification du débit • Dégradation de l'habitat • Pollution • Sédimentation
Naseux de Nooksack	Toutes	En voie de disparition	<ul style="list-style-type: none"> • Espèces aquatiques envahissantes • Changements du régime de débit – débit faible (changements climatiques) • Dégradation de l'habitat • Pollution

Espèce	Population	Statut selon le COSEPAC	Menaces environnementales catégorisées pour l'eau douce
			<ul style="list-style-type: none"> • Perturbation du milieu riverain
Meunier de Salish	Toutes	Menacée	<ul style="list-style-type: none"> • Espèces aquatiques envahissantes • Fragmentation • Dégradation de l'habitat • Pollution • Sédimentation
Truite fardée versant de l'ouest	Pacifique	Espèce préoccupante	<ul style="list-style-type: none"> • Changements du régime de débit – débit faible (changements climatiques) • Changements de la température – température chaude (changements climatiques) • Pêche (avec remise à l'eau) • Fragmentation • Dégradation de l'habitat • Hybridation avec les espèces indigènes
Esturgeon blanc	Bas Fraser	Menacée	<ul style="list-style-type: none"> • Pêche (prises accessoires, pêche avec remise à l'eau) • Fragmentation • Dégradation de l'habitat • Pollution • Déclin des proies • Perturbation du milieu riverain • Sédimentation
Esturgeon blanc	Haut Fraser	En voie de disparition	<ul style="list-style-type: none"> • Modification du débit • Pollution • Sédimentation
Saumon chinook	Toutes les populations pertinentes	–	<ul style="list-style-type: none"> • Changements du régime de débit (changements climatiques) • Changements de la température – température chaude (changements climatiques) • Pêche (surpêche) • Écloseries
Saumon chinook	CK-03 : Bas Fraser, automne 0.3 (UD2)	Menacée	<ul style="list-style-type: none"> • Dégradation de l'habitat (dans l'estuaire)
Saumon chinook	CK-04 : Bas Fraser, printemps 1.3 (UD3)	Espèce préoccupante	Aucune précisée (voir les menaces pour toutes les populations)

Espèce	Population	Statut selon le COSEPAC	Menaces environnementales catégorisées pour l'eau douce
Saumon chinook	CK-05 : Bas Fraser-Haute Pitt, été 1.3 (UD4)	En voie de disparition	Aucune précisée (voir les menaces pour toutes les populations)
Saumon chinook	CK-06 : Bas Fraser, été 1.3 (UD5)	Menacée	<ul style="list-style-type: none"> • Dégradation de l'habitat
Saumon chinook	CK-07 : Marécage Maria, été 0.3 (UD6)	En voie de disparition	<ul style="list-style-type: none"> • Changements du régime de débit – débit faible (changements climatiques) • Pollution
Saumon chinook	CK-08 : Moyen Fraser – canyon du Fraser, printemps 1.3 (UD7)	En voie de disparition	Aucune précisée (voir les menaces pour toutes les populations)
Saumon chinook	CK-09 : Moyen Fraser – Portage, automne 1.3 (UD8)	En voie de disparition	<ul style="list-style-type: none"> • Dégradation de l'habitat
Saumon chinook	CK-10 : Moyen Fraser, printemps 1.3 (UD9)	En voie de disparition	<ul style="list-style-type: none"> • Dégradation de l'habitat • Pollution
Saumon chinook	CK-11 : Moyen Fraser, été 1.3 (UD10)	Menacée	<ul style="list-style-type: none"> • Modification du débit • Pollution
Saumon chinook	CK-12 : Haut Fraser, printemps 1.3 (UD11)	En voie de disparition	<ul style="list-style-type: none"> • Espèces aquatiques envahissantes • Avalanches et glissements de terrain • Changements du régime de débit (changements climatiques) • Dégradation de l'habitat (changements climatiques) • Sédimentation
Saumon chinook	CK-14 : South Thompson, été 1.3 (UD13)	En voie de disparition	<ul style="list-style-type: none"> • Espèces aquatiques envahissantes • Avalanches et glissements de terrain • Changements du régime de débit – débit faible (changements climatiques) • Changements de la température – température chaude (changements climatiques) • Dégradation de l'habitat (changements climatiques)

Espèce	Population	Statut selon le COSEPAC	Menaces environnementales catégorisées pour l'eau douce
			<ul style="list-style-type: none"> • Écloseries • Pollution
Saumon chinook	CK-16 : South Thompson – ruisseau Bessette, été 1.2 (UD14)	En voie de disparition	<ul style="list-style-type: none"> • Espèces aquatiques envahissantes • Avalanches et glissements de terrain • Changements du régime de débit (changements climatiques) • Changements de la température – température chaude (changements climatiques) • Modification du débit • Dégradation de l'habitat (changements climatiques) • Pollution • Perturbation du milieu riverain
Saumon chinook	CK-17 : Basse Thompson, printemps 1.2 (UD15)	En voie de disparition	<ul style="list-style-type: none"> • Espèces aquatiques envahissantes • Avalanches et glissements de terrain • Changements du régime de débit (changements climatiques) • Changements de la température – température chaude (changements climatiques) • Dégradation de l'habitat (changements climatiques)
Saumon chinook	CK-18 : North Thompson, printemps 1.3 (UD16)	En voie de disparition	<ul style="list-style-type: none"> • Avalanches et glissements de terrain • Espèces aquatiques envahissantes • Changements du régime de débit (changements climatiques) • Changements de la température – température chaude (changements climatiques) • Dégradation de l'habitat (changements climatiques)
Saumon chinook	CK-19 : North Thompson, été 1.3 (UD17)	En voie de disparition	Aucune précisée (voir les menaces pour toutes les populations)
Saumon coho	Toutes les populations pertinentes	–	<ul style="list-style-type: none"> • Espèces aquatiques envahissantes

Espèce	Population	Statut selon le COSEPAC	Menaces environnementales catégorisées pour l'eau douce
			<ul style="list-style-type: none"> • Changements de la température – température chaude (changements climatiques) • Pêche (surpêche) • Dégradation de l'habitat
Saumon coho	CO-05 : Canyon du Fraser (UD4)	Menacée	Aucune précisée (voir les menaces pour toutes les populations)
Saumon coho	CO-07 : Basse Thompson (UD6)	Menacée	Aucune précisée (voir les menaces pour toutes les populations)
Saumon coho	CO-08 : South Thompson (UD7)	Menacée	Aucune précisée (voir les menaces pour toutes les populations)
Saumon coho	CO-09 : North Thompson (UD8)	Menacée	Aucune précisée (voir les menaces pour toutes les populations)
Saumon coho	CO-48 : Fraser de l'intérieur (UD5)	Menacée	Aucune précisée (voir les menaces pour toutes les populations)
Saumon rouge	Toutes les populations pertinentes	–	<ul style="list-style-type: none"> • Changements de la température – température chaude (changements climatiques) • Pêche (surpêche) • Modification du débit • Fragmentation • Pollution • Perturbation du milieu riverain
Saumon rouge	SEL-07-01 : Bowron, début de l'été (UD2)	En voie de disparition	Aucune précisée (voir les menaces pour toutes les populations)
Saumon rouge	SEL-03-02 : Cultus, tardive (UD6)	En voie de disparition	Aucune précisée (voir les menaces pour toutes les populations)
Saumon rouge	SEL-06-07 : François/Fraser, estivale (UD7)	Espèce préoccupante	Aucune précisée (voir les menaces pour toutes les populations)

Espèce	Population	Statut selon le COSEPAC	Menaces environnementales catégorisées pour l'eau douce
Saumon rouge	SEL-03-03 : Harrison, dévalaison, tardive (UD9)	Espèce préoccupante	Aucune précisée (voir les menaces pour toutes les populations)
Saumon rouge	SEL-03-04 : Harrison, montaison, tardive (UD10)	En voie de disparition	Aucune précisée (voir les menaces pour toutes les populations)
Saumon rouge	SEL-10-01 : Kamloops, début de l'été (UD11)	Espèce préoccupante	<ul style="list-style-type: none"> • Changements de la température – température chaude (changements climatiques) • Pollution
Saumon rouge	SEL-04-01 : Lillooet/Harrison, tardive (UD12)	Espèce préoccupante	<ul style="list-style-type: none"> • Dégradation de l'habitat
Saumon rouge	SEL-05-02 : Nahatlatch, début de l'été (UD13)	Espèce préoccupante	Aucune précisée (voir les menaces pour toutes les populations)
Saumon rouge	SEL-10-03 : North Barriere, début de l'été (UD14)	Menacée	Aucune précisée (voir les menaces pour toutes les populations)
Saumon rouge	SEL-06-10 : Quesnel, été (UD16)	En voie de disparition	<ul style="list-style-type: none"> • Changements de la température – température chaude (changements climatiques) • Pêche (surpêche) • Pollution
Saumon rouge	SEL-06-11 : Seton, tardive (UD17)	En voie de disparition	<ul style="list-style-type: none"> • Avalanches et glissements de terrain • Pêche (surpêche) • Pollution
Saumon rouge	SEL-06-14 : Takla/Trembleur, montaison précoce de la rivière Stuart (UD20)	En voie de disparition	<ul style="list-style-type: none"> • Changements du régime de débit (changements climatiques) • Changements de la température – température chaude (changements climatiques) • Pêche (surpêche)
Saumon rouge	SEL-06-13 : Takla/Trembleur/Stuart, été (UD21)	En voie de disparition	Aucune précisée (voir les menaces pour toutes les populations)

Espèce	Population	Statut selon le COSEPAC	Menaces environnementales catégorisées pour l'eau douce
Saumon rouge	SEL-06-16 : Taseko, début de l'été (UD22)	En voie de disparition	Aucune précisée (voir les menaces pour toutes les populations)
Saumon rouge	SER-02 : Ruisseau Widgeon (UD24)	Menacée	Aucune précisée (voir les menaces pour toutes les populations)
Saumon rouge	SEL-09-xx : Lac Adams, début de l'été (UD199)	En voie de disparition	Aucune précisée (voir les menaces pour toutes les populations)

ANNEXE C. INFORMATION SUR LES DONNÉES

Tableau C1. Données sur les menaces liées aux activités humaines et aux perturbations du paysage.

Données d'entrée	Type d'élément	Contribution à la menace	Critères d'inclusion	Fréquence des mises à jour	Horodatage	Source
Ponceaux	Points	Destruction de l'habitat dans les cours d'eau, modification du débit	Ponceaux modélisés pour le passage du poisson en Colombie-Britannique et ponceaux du ministère des Transports pour la destruction de l'habitat dans les cours d'eau. Ponceaux du MOT pour la modification du débit.	En cours (ponceaux modélisés); en cours (ponceaux du MOT)	Date de l'évaluation sur le terrain (ponceaux modélisés); aucun (ponceaux du MOT)	BC MOT Culverts ; Hillcrest Geographics BC Fish Passage - Modelled Culverts (bcfishpass on Github)
Barrages	Points et polygones	Destruction de l'habitat dans les cours d'eau, fragmentation longitudinale pour les espèces résidentes, fragmentation longitudinale pour les espèces anadromes, modification du débit	Points de barrage et polygones de barrage du Cumulative Effects Framework (BC CEF) de la Colombie-Britannique pour la destruction de l'habitat dans les cours d'eau. Uniquement les barrages actifs pour la modification du débit et les barrages déterminés comme des obstacles complets pour la fragmentation longitudinale.	En cours (mise à jour de l'outil BDOAC plusieurs fois par année); aucune mise à jour actuelle (CEF de la Colombie-Britannique terminé en 2022)	Date de construction; Date de mise à jour des données (BDOAC); Date d'acquisition des données (BC CEF)	Données utilisées : Base de données sur les obstacles aquatiques au Canada de la FCF (BDOAC) ; BC Cumulative Effects Framework – Human Disturbance ; Données originales : BC Dams
Infrastructures de lutte contre les inondations	Lignes	Perturbation du milieu riverain, destruction de l'habitat dans les cours d'eau, fragmentation latitudinale	Tous inclus.	En cours (mise à jour tous les 10 ans).	Date du relevé	BC Flood Protection Works - Structural Works

Données d'entrée	Type d'élément	Contribution à la menace	Critères d'inclusion	Fréquence des mises à jour	Horodatage	Source
Blocs de coupe forestière	Polygones	Perturbation du milieu riverain, éléments nutritifs, sédimentation	Sous-ensemble de 2012 à 2022. (Étendue des réserves forestières retirée des polygones de blocs de coupe.)	Annuelle	Année de récolte; date d'ajout de l'élément dans l'ensemble de données	Harvested Ares of BC (Consolidated Cutblocks)
Feux de forêt	Polygones	Perturbation du milieu riverain, éléments nutritifs, sédimentation	Sous-ensemble de 2012 à 2023.	Annuelle	Année du feu; date d'ajout de l'élément dans l'ensemble de données	BC Fire Perimeters – Current ; BC Fire Perimeters – Historical
Défoliation par les ravageurs forestiers	Polygones	Perturbation du milieu riverain, éléments nutritifs	Sous-ensemble de 2012 à 2022. Dommages par les animaux et facteurs abiotiques exclus. Un seuil minimal de défoliation grave par les ravageurs a été utilisé pour les éléments nutritifs.	Annuelle	Date d'occurrence	BC Pest Infestation Polygons
Classe de terres : Agriculture	Matrice	Perturbation du milieu riverain, éléments nutritifs, pollution	Matrice de 2022.	Annuelle	Année de l'image	Sentinel-2 Land Use / Land Cover
Classe de terres : Autres non urbaines	Matrice	Éléments nutritifs, sédimentation	Matrice de 2022.	Annuelle	Année de l'image	Sentinel-2 Land Use / Land Cover
Classe de terres : Parcours naturels	Matrice et polygones	Perturbation du milieu riverain, destruction de l'habitat dans les cours d'eau	Matrice de 2022. Les données de la matrice des parcours naturels ont été masquées pour n'inclure que les zones qui chevauchent les polygones des parcours	Annuelle	Année de l'image	Sentinel-2 Land Use / Land Cover ; BC Range Pasture Polygons

Données d'entrée	Type d'élément	Contribution à la menace	Critères d'inclusion	Fréquence des mises à jour	Horodatage	Source
			naturels et des pâturages de la Colombie-Britannique.			
Classe de terres : Urbaines	Matrice	Perturbation du milieu riverain, éléments nutritifs, pollution, fragmentation latitudinale	Matrice de 2022.	Annuelle	Année de l'image	Sentinel-2 Land Use / Land Cover
Exploitation minière	Polygones	Destruction de l'habitat dans les cours d'eau, perturbation du milieu riverain, sédimentation, éléments nutritifs	Comprend les mines dans un rayon de 30 m des cours d'eau pour la destruction de l'habitat dans les cours d'eau.	Aucune mise à jour actuelle (effectuée en 2022); peut utiliser d'autres sources de données	Date d'acquisition des données	BC Cumulative Effects Framework – Human Disturbance
Obstacles naturels pour le poisson	Points	Fragmentation longitudinale pour les espèces anadromes, fragmentation longitudinale pour les espèces résidentes	Obstacles d'un gradient de 15 % pour la fragmentation longitudinale pour les espèces anadromes. Pour la fragmentation longitudinale pour les espèces résidentes, seuls les obstacles naturels situés dans les tronçons de cours d'eau reliés à un barrage ont été inclus.	En cours (mise à jour plusieurs fois par année)	Aucune	Hillcrest Geographics BC Fish Passage (bcfishpass on Github)
Espèces non indigènes	Points	Espèces aquatiques envahissantes	Sous-ensemble de 1980 à 2023.	En cours (plusieurs fois par année)	Date d'occurrence	Aquatic Invasive Species of British Columbia
Emprise des pipelines	Polygones	Perturbation du milieu riverain	Les routes ont été exclues par le BC Cumulative Effects Framework.	Annuelle	Date de la mise à jour des données	Données utilisées : BC Cumulative Effects

Données d'entrée	Type d'élément	Contribution à la menace	Critères d'inclusion	Fréquence des mises à jour	Horodatage	Source
						Framework, Human Disturbance ; Données originales : BC Energy Regulator (BCER) Oil and Gas Surface Land Use
Sources ponctuelles d'éléments nutritifs et de pollution	Points	Éléments nutritifs et pollution	Suppression de la catégorie « autres toxines », car elle comprenait les sédiments. Utilisation des estimations de rejets élevés, qui comprenait une valeur de limite de détection.	Aucune mise à jour actuelle (effectuée en 2022)	Aucune	Outil d'inventaire des polluants affectant les baleines et leurs proies (OIPABP)
Emprise des lignes de transport d'électricité (droit de passage)	Polygones	Perturbation du milieu riverain	Zone tampon à 12,5 m par le BC Cumulative Effects Framework.	En cours (non modifiée depuis 2018)	Date d'ajout de l'élément dans l'ensemble de données	Données utilisées : BC Cumulative Effects Framework, Human Disturbance ; Données originales : GeoBC BC Transmission Lines
Chemins de fer	Lignes	Perturbation du milieu riverain, destruction de l'habitat dans les cours d'eau	Passages à niveau seulement pour la destruction de l'habitat dans les cours d'eau.	En cours (non modifiée depuis 2015)	Date d'ajout de l'élément dans l'ensemble de données	GeoBC GeoBase National Railway Network (NRWN)
Routes	Lignes	Perturbation du milieu riverain, sédimentation, éléments nutritifs, pollution, destruction	Traversées de routes seulement pour la destruction de l'habitat dans les cours d'eau. Toutes les routes ont été incluses pour les autres menaces.	Aucune mise à jour actuelle (effectuée en 2022); possibilité d'utiliser les	Date d'acquisition des données; date de tenure des routes forestières; date d'approbation du permis pour les	BC Cumulative Effects Framework, Integrated Roads

Données d'entrée	Type d'élément	Contribution à la menace	Critères d'inclusion	Fréquence des mises à jour	Horodatage	Source
		de l'habitat dans les cours d'eau		sources de données originales qui sont mises à jour	routes de l'industrie pétrolière et gazière	
Extraction d'eau	Points et lignes	Destruction de l'habitat dans les cours d'eau, modification du débit	Seuls les permis d'extraction d'eau actifs (points) ont été inclus pour la modification du débit. Les infrastructures d'extraction de l'eau (conduites, tuyaux, pompes, etc.) ont été utilisées pour la destruction de l'habitat dans les cours d'eau.	En cours (permis d'extraction d'eau actualisé tous les 2 jours)	Date de statut du permis	BC Water Rights Licences - Public ; BC Water Licensed Works - Lines

ANNEXE D. COTES DE LA MODIFICATION DU DÉBIT

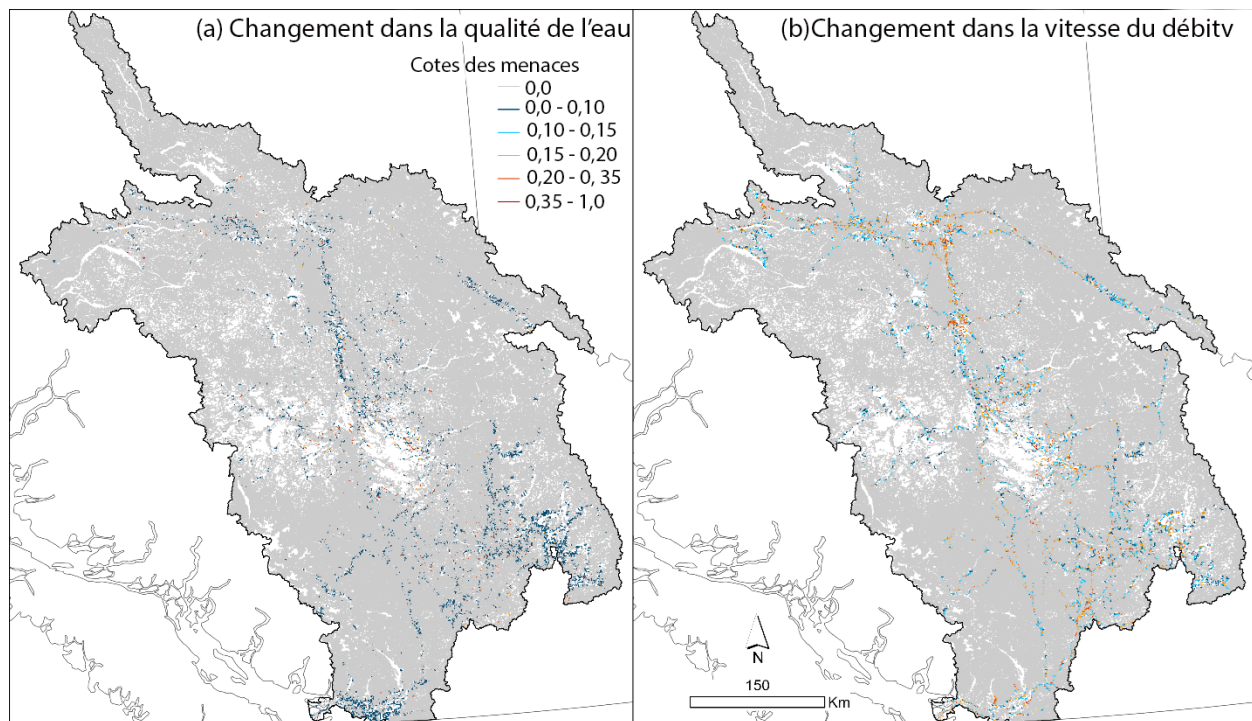


Figure D1. Cotes de la modification du débit fondées sur le changement (a) de la quantité d'eau des permis d'extraction d'eau et des barrages et (b) de la vitesse du débit après les ponceaux.

ANNEXE E. MODÈLES CLIMATIQUES MONDIAUX

Tableau E1. Modèles climatiques mondiaux (MCG) contribuant aux moyennes d'ensemble utilisées pour le calcul des menaces liées aux changements climatiques. Les MCG des risques d'inondation provenaient de la phase 6 du Projet de comparaison de modèles couplés. Les MCG du débit des cours d'eau et de la température des cours d'eau provenaient de la phase 5 du Projet de comparaison de modèles couplés.

Risque d'inondation	Débit des cours d'eau	Température des cours d'eau
MIROC6	ACCESS1-0	CanESM2
BCC-CSM2-MR	CanESM2	CSIRO-Mk3-6-0
CanESM5	CCSM4	GFDL-CM3
MRI-ESM2-0	CNRM-CM5	HadGEM2-ES
NIMS-KMA.KACE-1-0-G	HadGEM2-ES	MIROC-ESM
MPI-ESM1-2-LR	MPI-ESM-LR	MPI-ESM-LR
INM-CM5-0	–	–
INM-CM4-8	–	–
MPI-ESM1-2-HR	–	–
CMCC.CMCC-CM2-SR5	–	–
CCCR-IITM.IITM-ESM	–	–
IPSL.IPSL-CM6A-LR	–	–
NorESM2-MM	–	–
NorESM2-LM	–	–
EC-Earth-Consortium.EC-Earth3	–	–
CSIRO-ARCCSS.ACCESS-CM2	–	–
GFDL-CM4	–	–

ANNEXE F. PARAMÈTRES DE RENDEMENT DU DÉBIT DES COURS D'EAU

Les paramètres de rendement ont été calculés par Foundry Spatial en comparant le débit du cours d'eau à échelle réduite à 86 stations hydrométriques dans l'ensemble du BFF. Comme le débit à échelle réduite correspondait étroitement aux résultats du modèle CIV-GL original ($R^2 = 0,99$), ces paramètres indiquent généralement le rendement du modèle original (Schnorbus 2020). Le débit annuel total modélisé correspondait bien au débit annuel total observé (tableau F1). Parmi les mois et les paramètres (minimum, maximum, moyenne), c'est pour les débits minimaux d'août et de septembre que l'on a relevé le plus grand écart par rapport au débit observé (tableau F1). L'erreur absolue moyenne et le pourcentage d'erreur variaient spatialement dans l'ensemble du BFF, l'erreur relative étant plus élevée dans la zone centrale du bassin, particulièrement en automne et en hiver (figure F1).

Tableau F1. Résultats du rendement du débit à échelle réduite dans le modèle CIV-GL par rapport aux observations de 86 stations hydrométriques.

Échelle de temps	R ²			Erreur absolue moyenne			Pourcentage d'erreur absolu moyen			Efficacité de Nash-Sutcliffe		
	Min.	Max.	Moyenne	Min.	Max.	Moyenne	Min.	Max.	Moyenne	Min.	Max.	Moyenne
Janvier	0,97	0,93	0,95	7,58	32,70	11,74	0,54	0,58	0,39	0,97	0,95	0,97
Février	0,87	0,90	0,89	9,48	40,85	14,32	0,56	0,72	0,43	0,92	0,93	0,94
Mars	0,68	0,95	0,95	11,48	37,83	12,11	0,56	0,68	0,38	0,86	0,95	0,97
Avril	0,82	0,92	0,99	17,69	72,05	18,69	0,58	0,49	0,42	0,91	0,86	0,99
Mai	0,82	0,89	0,99	54,13	154,59	40,67	0,68	0,48	0,45	0,91	0,82	0,99
Juin	0,88	0,95	0,99	72,96	139,36	44,30	0,51	0,39	0,33	0,93	0,91	0,99
Juillet	0,60	0,93	0,99	78,01	138,37	31,69	0,66	0,58	0,38	0,84	0,88	0,99
Août	0,35	0,95	0,95	63,96	79,29	46,24	0,85	0,51	0,49	0,79	0,92	0,96
Septembre	0,34	0,98	0,97	38,44	43,78	25,28	0,79	0,46	0,43	0,79	0,97	0,98
Octobre	0,81	0,95	0,99	18,88	47,34	14,91	0,58	0,41	0,36	0,90	0,92	0,99
Novembre	0,76	0,97	0,93	17,68	37,03	25,82	0,55	0,53	0,45	0,88	0,98	0,96
Décembre	0,87	0,93	0,95	11,29	33,64	15,36	0,55	0,54	0,45	0,93	0,96	0,97
Hiver	0,90	0,96	0,95	10,02	25,41	12,27	0,56	0,47	0,40	0,94	0,97	0,97
Printemps	0,84	0,94	0,99	33,48	58,66	18,76	0,48	0,38	0,36	0,91	0,9	0,99
Été	0,86	0,98	1,00	56,31	70,91	25,89	0,52	0,37	0,30	0,92	0,97	1,00
Automne	0,58	0,98	0,96	28,22	26,06	24,17	0,62	0,41	0,41	0,84	0,98	0,97

Échelle de temps	R ²			Erreur absolue moyenne			Pourcentage d'erreur absolu moyen			Efficacité de Nash-Sutcliffe		
	Min.	Max.	Moyenne	Min.	Max.	Moyenne	Min.	Max.	Moyenne	Min.	Max.	Moyenne
Annuelle	0,93	0,98	0,99	25,64	26,32	18,20	0,35	0,26	0,25	0,95	0,98	0,99

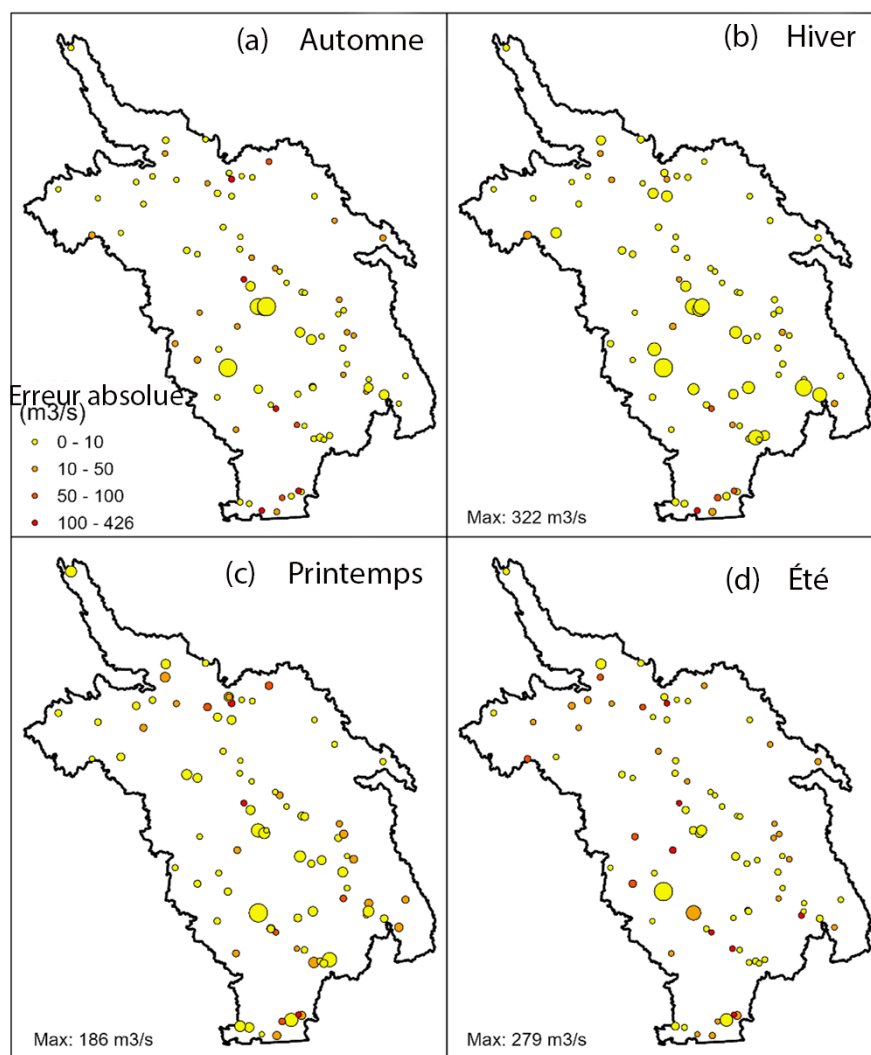


Figure F1. Erreur absolue moyenne du débit saisonnier moyen à échelle réduite (m³/s) pour 86 stations hydrométriques. La taille des symboles varie en fonction du pourcentage d'erreur absolue moyenne.

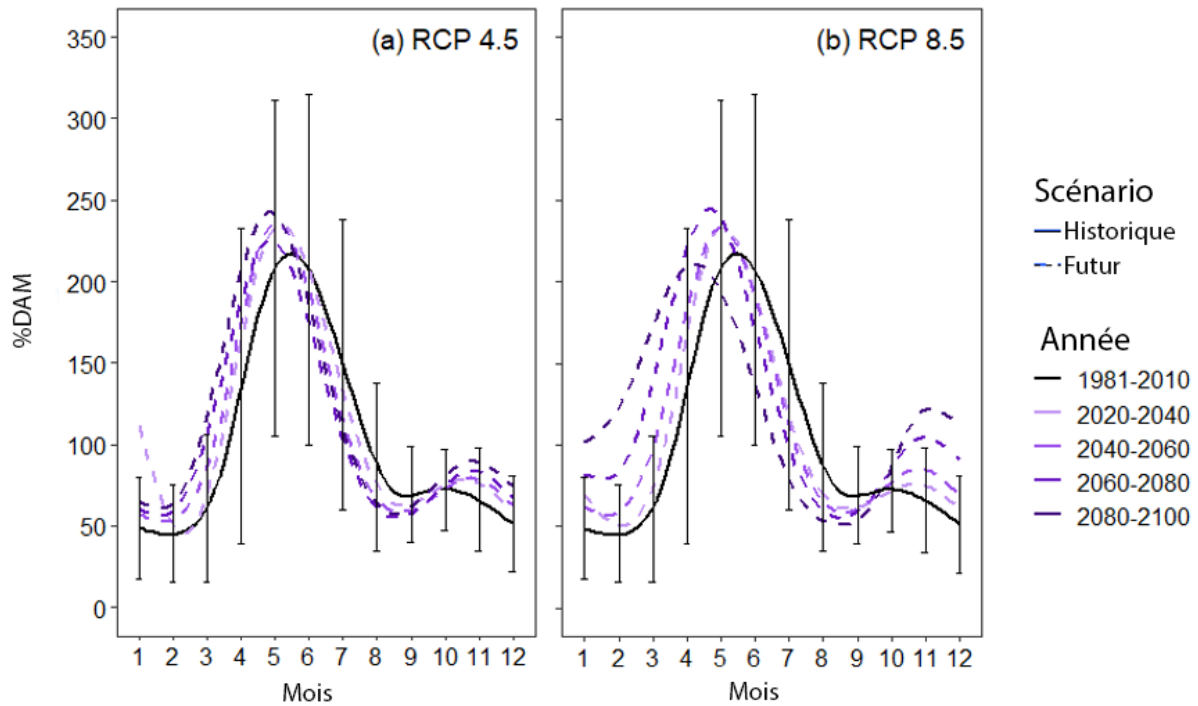


Figure F2. Série chronologique des pourcentages du débit annuel moyen (%DAM, calculés à l'aide de valeurs mensuelles) fondés sur le débit modélisé des cours d'eau pour les conditions climatiques historiques et futures selon les profils (a) RCP 4.5 et (b) RCP 8.5. Le %DAM pour les mois des périodes futures est calculé en fonction du DAM de la période historique. L'écart type est précisé pour la période historique afin d'indiquer le degré de variation entre les cours d'eau du bassin du fleuve Fraser.

ANNEXE G. COTES DES MENACES CUMULATIVES PAR UNITÉ DE CONSERVATION DU SAUMON

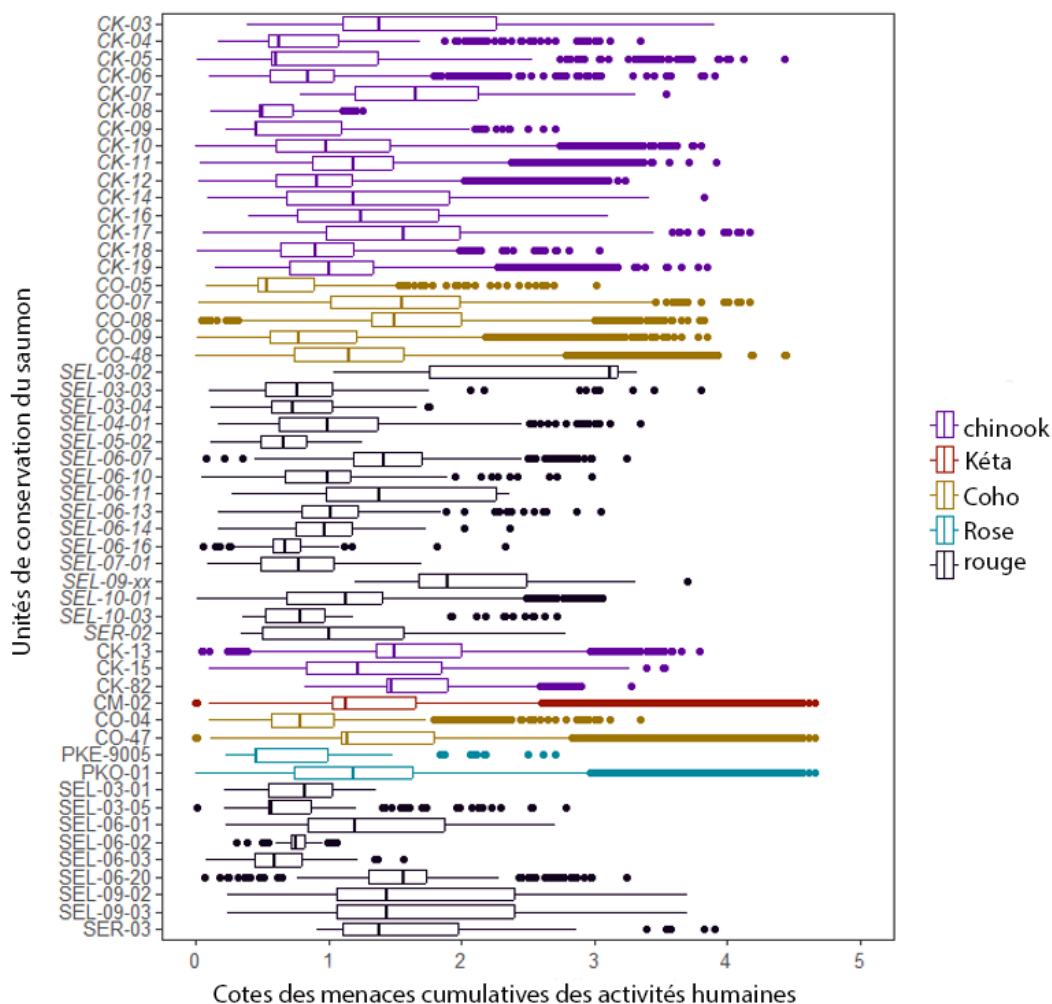


Figure G1. Diagrammes de quartiles de Tukey de la cote des menaces cumulatives des activités humaines pour chaque unité de conservation (UC) du saumon dans le bassin du fleuve Fraser (inclut uniquement les cours d'eau en aval des obstacles naturels pour le saumon). Les UC désignées comme étant préoccupantes, menacées ou en voie de disparition (« en péril ») par le COSEPAC sont en italiques. Les UC comprenaient les unités du saumon chinook (CK), coho (CO), rose – années paires (PKE), rose – années impaires (PKO), rouge – type lacustre (SEL) et rouge – type fluvial (SER). La ligne du diagramme représente la médiane des tronçons de cours d'eau, les charnières inférieure et supérieure représentent respectivement les 25^e et 75^e centiles, et les valeurs aberrantes sont les points au-dessus ou en dessous de $1,5 \times$ la plage interquartile.

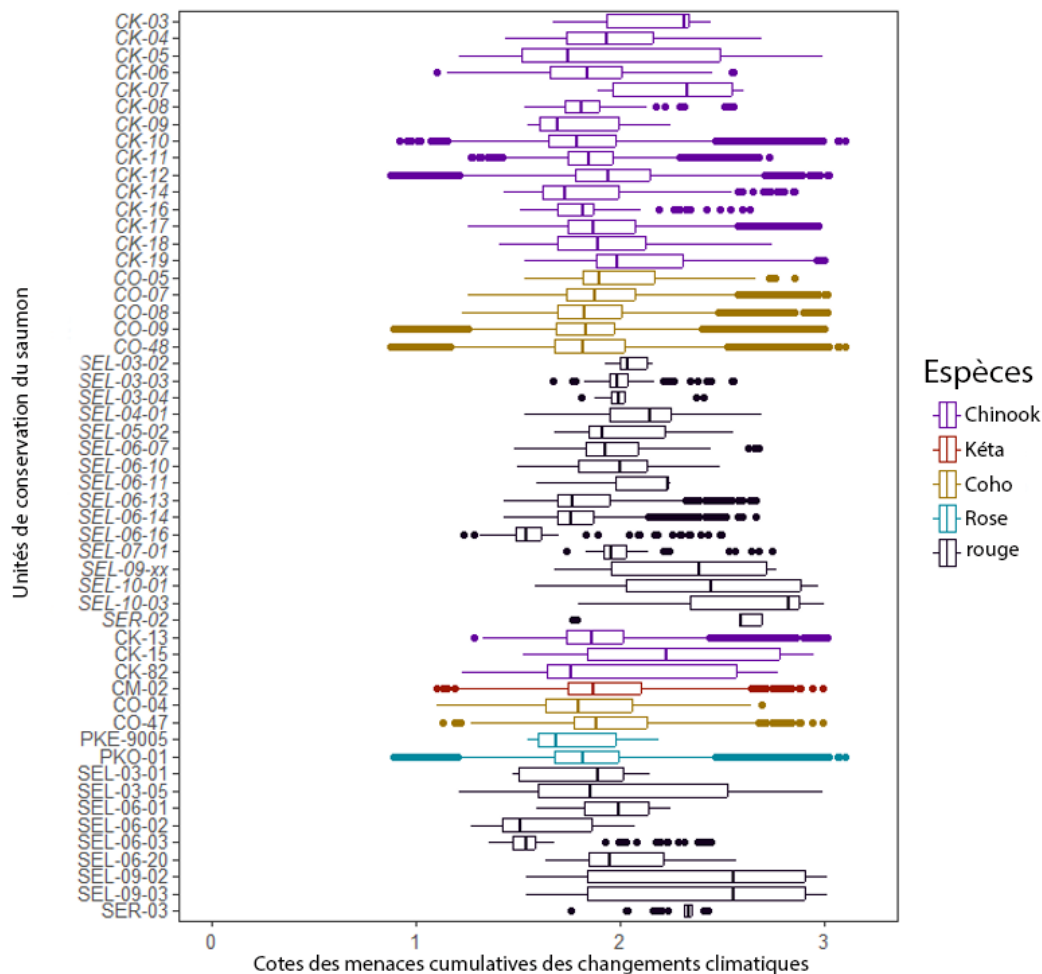


Figure G2. Diagrammes de quartiles de Tukey de la cote des menaces cumulatives liées aux changements climatiques pour 2040-2060 pour le profil RPC 4.5 pour chaque unité de conservation (UC) du saumon dans le bassin du fleuve Fraser (inclut uniquement les cours d'eau en aval des obstacles naturels pour le saumon). Les UC désignées comme étant préoccupantes, menacées ou en voie de disparition (« en péril ») par le COSEPAC sont en italiques. Les UC comprenaient les unités du saumon chinook (CK), coho (CO), rose – années paires (PKE), rose – années impaires (PKO), rouge – type lacustre (SEL) et rouge – type fluvial (SER). La ligne du diagramme représente la médiane des tronçons de cours d'eau, les charnières inférieure et supérieure représentent respectivement les 25^e et 75^e centiles, et les valeurs aberrantes sont les points au-dessus ou en dessous de $1,5 \times$ la plage interquartile.

ANNEXE H. RÉSULTATS PROJÉTÉS POUR L'UHE DE THOMPSON-NICOLA

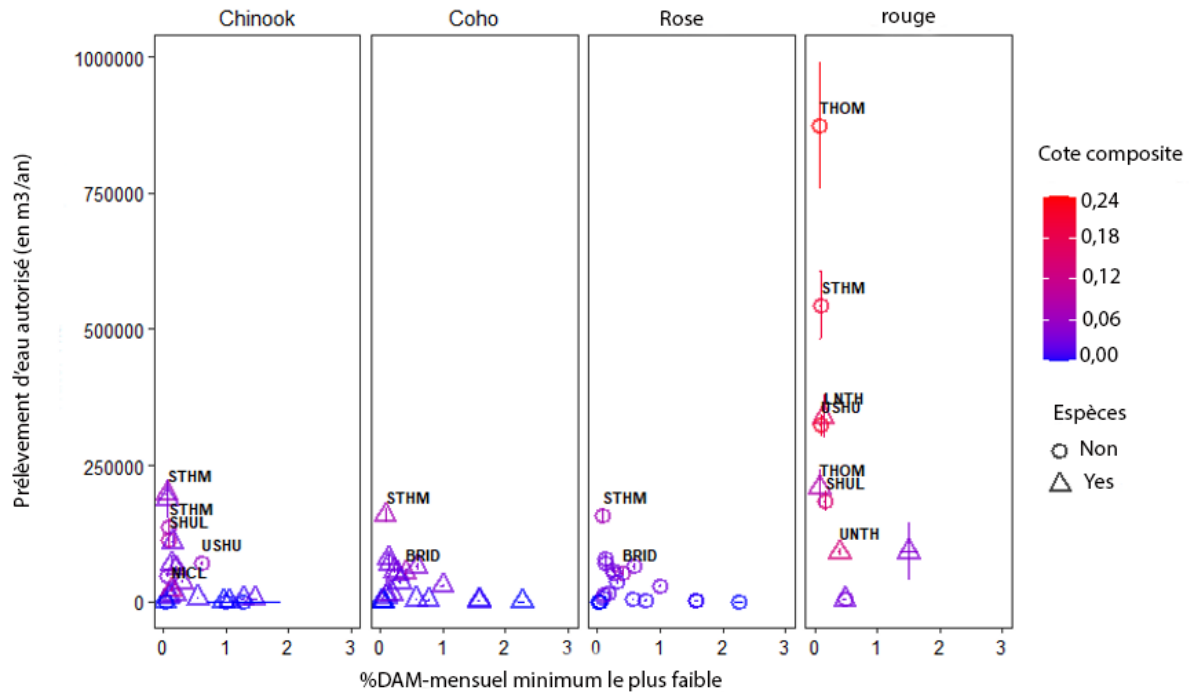


Figure H1. Cote composite des ressources en eau, fondée sur l'inverse du débit mensuel minimal (%DAM) le plus faible dans des conditions climatiques futures (de 2040 à 2060) pour le profil RCP 4.5 et les quantités d'extraction d'eau autorisées dans l'UHE de Thompson-Nicola. La moyenne des cotes des cours d'eau a été établie par groupe de bassins hydrographiques, et les UC de saumon connexes, différenciées par leur statut de risque. Les groupes de bassins hydrographiques et les UC de saumon ayant une cote composite moyenne supérieure à 0,05 sont étiquetés : ruisseau Bridge (BRID), cours inférieur de la rivière North Thompson (LNTN), rivière Nicola (NICL), lac Shuswap (SHUL), rivière South Thompson (STHM), rivière Thompson (THOM) et cours supérieur de la rivière North Thompson (UNTH). Les points pour les deux axes correspondent à la moyenne ± 1 ET.

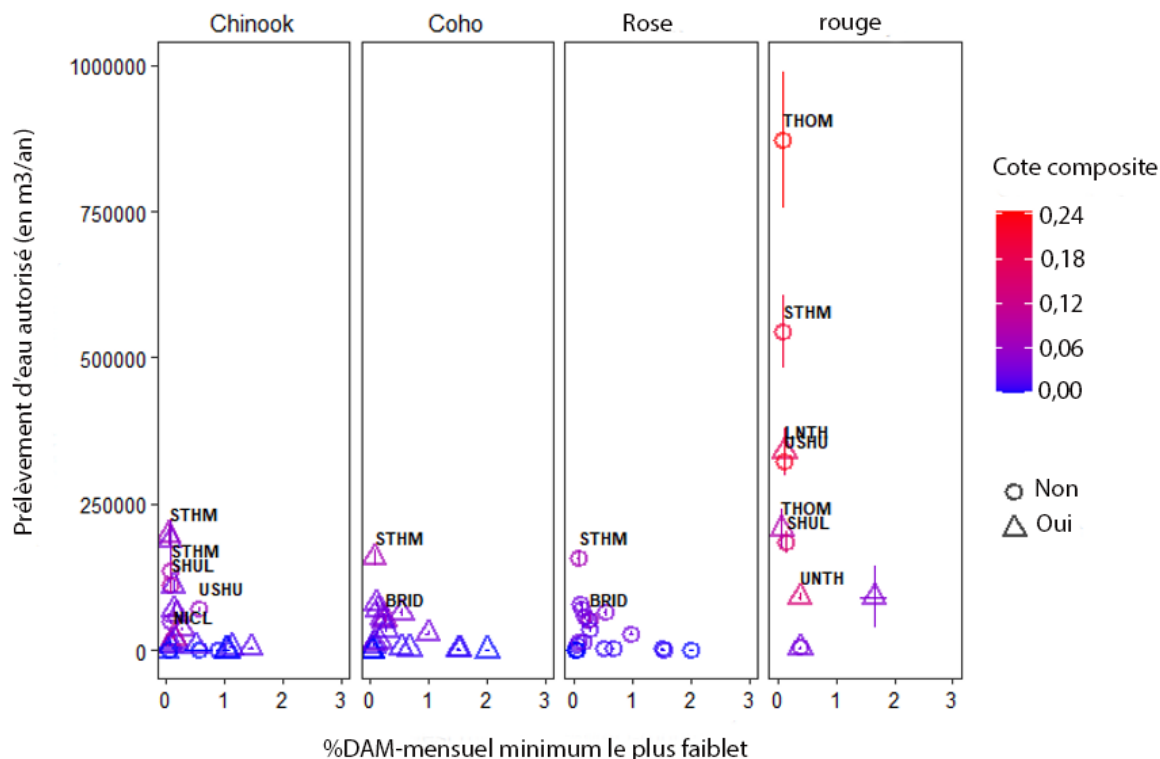


Figure H2. Cote composite des ressources en eau, fondée sur l'inverse du débit mensuel minimal (%DAM) le plus faible dans des conditions climatiques futures (de 2040 à 2060) pour le profil RCP 8.5 et les quantités d'extraction d'eau autorisées dans l'UHE de Thompson-Nicola. La moyenne des cotes des cours d'eau a été établie par groupe de bassins hydrographiques et les UC de saumon connexes, différenciées par leur statut de risque. Les groupes de bassins hydrographiques et les UC de saumon ayant une cote composite moyenne supérieure à 0,05 sont étiquetés : ruisseau Bridge (BRID), cours inférieur de la rivière North Thompson (LNTN), rivière Nicola (NICL), lac Shuswap (SHUL), rivière South Thompson (STHM) et rivière Thompson (THOM). Les points pour les deux axes correspondent à la moyenne ± 1 ET.

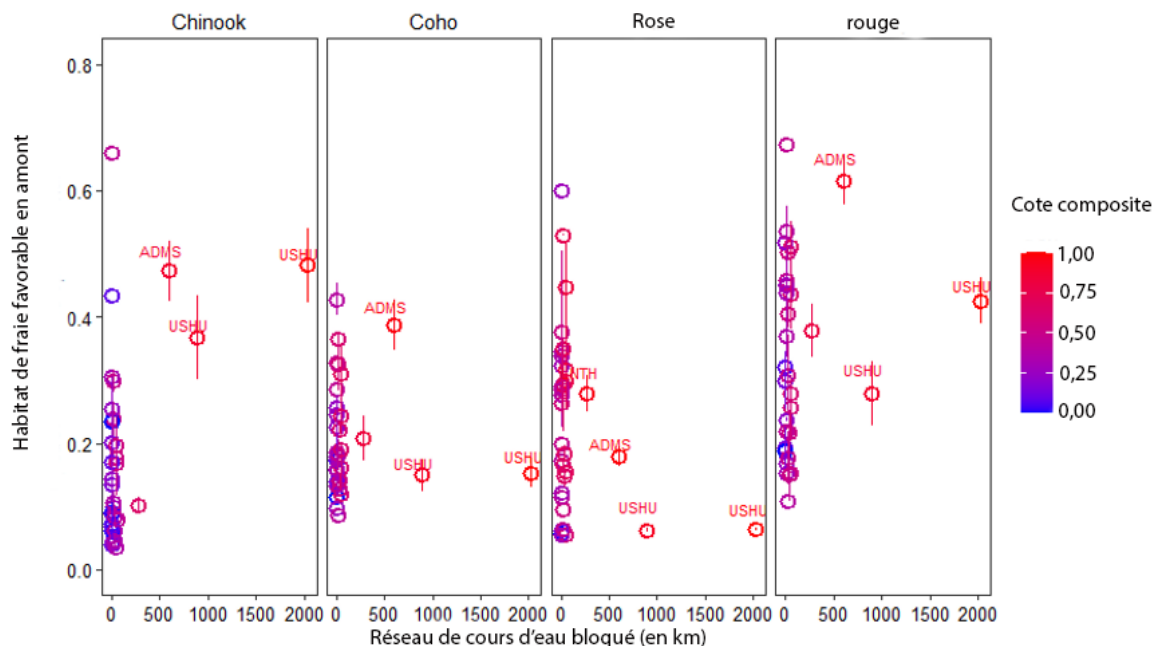


Figure H3. Cote composite de la fragmentation pour les espèces anadromes, fondée sur la quantité bloquée du réseau de cours d'eau en amont d'un barrage initial jusqu'aux obstacles subséquents (naturels ou créés par des barrages) et la moyenne correspondante de l'habitat de fraie favorable modélisé en amont dans l'UHE de Thompson-Nicola. L'habitat de fraie favorable se rapporte aux conditions futures, RCP 4.5, de 2041 à 2060. Les groupes de bassins hydrographiques sont étiquetés pour les cours d'eau bloqués dont les cotes composites sont supérieures à 0,85 et comprennent la rivière Adams (ADMS), le cours inférieur de la rivière North Thompson (LNTN) et la haute Shuswap (USHU). Les points sont la moyenne ± 1 ET.

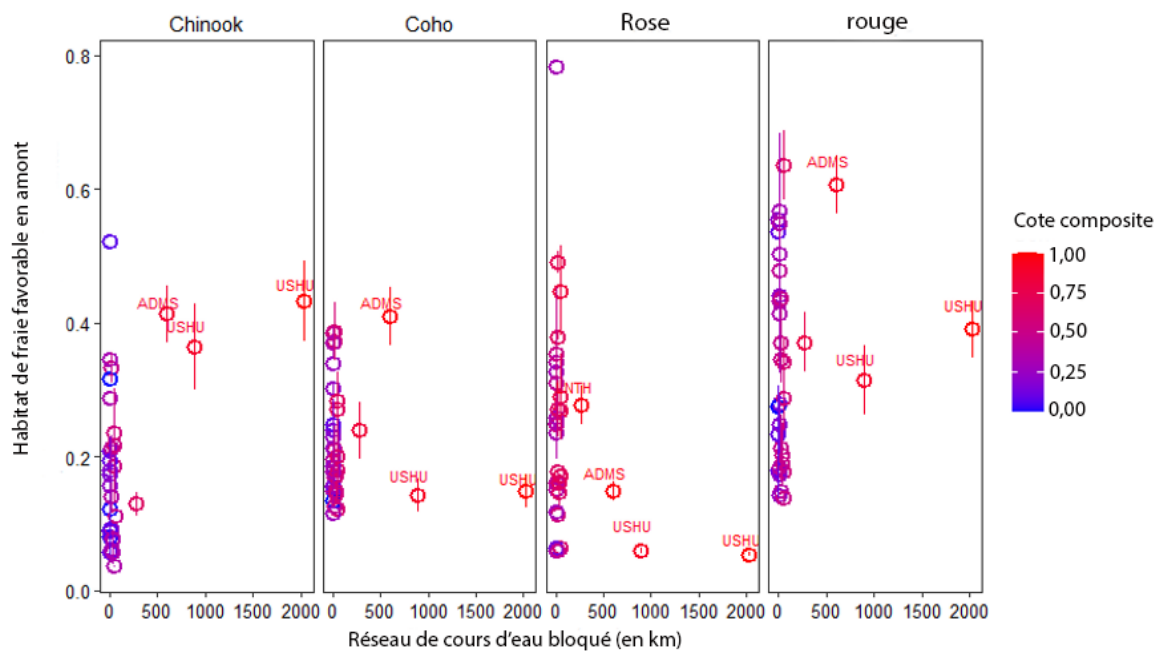


Figure H4. Cote composite de la fragmentation pour les espèces anadromes, fondée sur la quantité bloquée du réseau de cours d'eau en amont d'un barrage initial jusqu'aux obstacles subséquents (naturels ou créés par des barrages) et la moyenne correspondante de l'habitat de fraie favorable modélisé en amont dans l'UHE de Thompson-Nicola. L'habitat de fraie favorable se rapporte aux conditions futures, RCP 8.5, de 2041 à 2060. Les groupes de bassins hydrographiques sont étiquetés pour les cours d'eau bloqués dont les cotes de risque sont supérieures à 0,85 et comprennent la rivière Adams (ADMS), le cours inférieur de la rivière North Thompson (LNTH) et la haute Shuswap (USHU). Les points sont la moyenne \pm 1 ET.