



Pêches et Océans
Canada

Fisheries and Oceans
Canada

Sciences des écosystèmes
et des océans

Ecosystems and
Oceans Science

Secrétariat canadien de consultation scientifique (SCCS)

Document de recherche 2019/017

Région de la capitale nationale

Évaluation du risque pour le saumon rouge du fleuve Fraser attribuable au transfert de la bactérie *Aeromonas salmonicida* à partir des fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery (Colombie-Britannique)

C. Mimeault¹, P. Aubry², D. Wan³, J. Wade⁴, F. Boily¹, S.R.M. Jones⁵, S. Johnson⁵,
M.G.G. Foreman³, P.C. Chandler³, K.A. Garver⁵, C. Holt⁵, I.J. Burgetz¹ et G.J. Parsons¹

¹Pêches et Océans Canada
Division des sciences de l'aquaculture, de la biotechnologie
et de la santé des animaux aquatiques
200, rue Kent
Ottawa (Ontario) K1A 0E6

²Agence canadienne d'inspection des aliments
Division des sciences de la santé animale
1400, Merivale
Ottawa (Ontario) K1A 0Y9

³Pêches et Océans Canada
Institut des sciences marines
9860, chemin West Saanich
Sidney (Colombie-Britannique) V8L 5T5

⁴Fundy Aqua Services Inc.
1859, Delanice Way
NanOOSE Bay (Colombie-Britannique) V9P 9B3

⁵Pêches et Océans Canada
Station biologique du Pacifique
3190, chemin Hammond Bay
Nanaimo (Colombie-Britannique) V9T 6N7

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 de consultation scientifique
200, rue Kent
Ottawa (Ontario) K1A 0E6

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



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, 2020
ISSN 2292-4272

La présente publication doit être citée comme suit :

Mimeault, C., Aubry, P., Wan, D., Wade, J., Boily, F., Jones, S.R.M., Johnson, S., Foreman, M.G.G., Chandler, P. C., Garver, K.A., Holt, C., Burgetz, I.J. et Parsons, G.J. 2020. Évaluation du risque pour le saumon rouge du fleuve Fraser attribuable au transfert de la bactérie *Aeromonas salmonicida* à partir des fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery (Colombie-Britannique). Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech. 2019/017. xi + 73 p.

Also available in English :

Mimeault, C., Aubry, P., Wan, D., Wade, J., Boily, F., Jones, S.R.M., Johnson, S., Foreman, M.G.G., Chandler, P. C., Garver, K.A., Holt, C., Burgetz, I.J. and Parsons, G.J. 2020. Assessment of the risk to Fraser River Sockeye Salmon due to *Aeromonas salmonicida* transfer from Atlantic Salmon farms in the Discovery Islands area, British Columbia. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2019/017. ix + 64 p.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX	v
LISTE DES FIGURES	vii
GLOSSAIRE	viii
RÉSUMÉ	x
1 INTRODUCTION	1
2 CONTEXTE	1
2.1 OBJECTIFS DE GESTION ET DE PROTECTION	2
2.2 DÉFINITION DU PROBLÈME	2
2.2.1 Détermination du danger	2
2.2.2 Caractérisation du danger	2
2.2.3 Portée	2
2.2.4 Question sur le risque	4
2.2.5 Méthodologie	4
3 ÉVALUATION DE LA PROBABILITÉ	10
3.1 ÉVALUATION DE L'INFECTION À LA FERME	10
3.1.1 Question	10
3.1.2 Considérations	10
3.1.3 Hypothèses	18
3.1.4 Probabilité d'infection à une ferme	18
3.2 ÉVALUATION DE LA DISSÉMINATION	19
3.2.1 Question	19
3.2.2 Considérations	19
3.2.3 Hypothèses	20
3.2.4 Probabilité de dissémination	20
3.3 ÉVALUATION DE L'EXPOSITION	22
3.3.1 Question	22
3.3.2 Considérations	22
3.3.3 Hypothèses	28
3.3.4 Probabilité d'exposition	28
3.4 ÉVALUATION DE L'INFECTION	30
3.4.1 Question	30
3.4.2 Considérations	30
3.4.3 Hypothèses	37
3.4.4 Probabilité d'infection	38
3.5 ÉVALUATION DE LA PROBABILITÉ GLOBALE	39
4 ÉVALUATION DES CONSÉQUENCES	40
4.1 QUESTION	41
4.2 CONSIDÉRATIONS	41

4.2.1	Dynamique de l'infection à <i>Aeromonas salmonicida</i>	41
4.2.2	Effets sublétaux de l'infection par <i>Aeromonas salmonicida</i>	42
4.2.3	Estimation de la densité du saumon rouge du fleuve Fraser	42
4.2.4	Estimation de la proportion potentiellement exposée à des fermes contaminées	43
4.2.5	Estimations de l'exposition sur deux générations	44
4.3	HYPOTHÈSES	45
4.4	AMPLEUR DES CONSÉQUENCES	45
4.4.1	Saumon rouge juvénile du fleuve Fraser	46
4.4.2	Saumon rouge adulte du fleuve Fraser	47
4.4.3	Autres espèces sensibles de saumons du Pacifique	48
5	ESTIMATION DU RISQUE	49
5.1	ABONDANCE	49
5.2	DIVERSITÉ	49
6	SOURCES D'INCERTITUDE	50
6.1	ÉVALUATION DE LA PROBABILITÉ	50
6.2	ÉVALUATION DES CONSÉQUENCES	50
7	CONCLUSIONS	50
8	RÉFÉRENCES CITÉES	51
9	ANNEXES	58
9.1	ANNEXE A : PROGRAMME DE VÉRIFICATION ET DE SURVEILLANCE DE LA SANTÉ DES POISSONS	58
9.2	ANNEXE B : ÉVÉNEMENTS LIÉS À LA SANTÉ DES POISSONS ATTRIBUÉS À LA FURONCULOSE	59
9.3	ANNEXE C : SURVEILLANCE ET DÉPISTAGE EFFECTUÉS PAR L'INDUSTRIE	60
9.4	ANNEXE D : MODÈLE DE DISPERSION DE LA BACTÉRIE <i>AEROMONAS SALMONICIDA</i>	61
9.5	ANNEXE E : PROPORTION DE LA POPULATION POTENTIELLEMENT EXPOSÉE	
	62	
9.5.1	Juvéniles	62
9.5.2	Adultes	63
9.6	ANNEXE F : EXPOSITION SUR DEUX GÉNÉRATIONS	66
9.6.1	Approche du processus binomial	66
9.6.2	Méthode de simulation	68
9.7	ANNEXE G : MODÉLISATION DE LA PROPAGATION DE L'INFECTION PAR <i>AEROMONAS SALMONICIDA</i> CHEZ LE SAUMON ROUGE SAUVAGE DU FLEUVE FRASER	69

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Liste des 18 fermes d'élevage de saumon atlantique actives incluses dans l'évaluation du risque.	4
Tableau 2. Catégories et définitions utilisées pour décrire la probabilité d'un événement sur une période d'un an.	5
Tableau 3. Catégories et définitions utilisées pour décrire les conséquences possibles sur l'abondance du saumon rouge du fleuve Fraser.	6
Tableau 4. Catégories et définitions utilisées pour décrire les conséquences possibles sur la diversité du saumon rouge du fleuve Fraser.	6
Tableau 5. Catégories et définitions utilisées pour décrire le niveau d'incertitude associé aux données et aux renseignements.	7
Tableau 6. Catégories et définitions utilisées pour décrire le niveau d'incertitude associé à la gestion de la santé des poissons.	8
Tableau 7. Nombre de fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery dans lesquelles on a trouvé des preuves d'infection par <i>Aeromonas salmonicida</i> ou de furonculose, résumé par année.	17
Tableau 8. Facteurs contributifs et limitatifs de la probabilité que des saumons atlantiques d'élevage contaminés par <i>Aeromonas salmonicida</i> soient présents dans une ou plusieurs fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery selon les pratiques actuelles de gestion de la santé des poissons.	18
Tableau 9. Facteurs contributifs et limitatifs de la probabilité que la bactérie <i>Aeromonas salmonicida</i> se dissémine à partir de fermes d'élevage contenant des saumons atlantiques contaminés ou malades dans la région des îles Discovery, compte tenu des pratiques d'élevage actuelles.	21
Tableau 10. Nombre de fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery dans lesquelles on a trouvé des preuves d'infection par <i>Aeromonas salmonicida</i> ou de furonculose, résumé par mois.	27
Tableau 11. Nombre de fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery dans lesquelles on a trouvé des preuves de la présence de la bactérie <i>Aeromonas salmonicida</i> ou de furonculose, résumé par année et par mois.	28
Tableau 12. Facteurs contributifs ou limitatifs de la probabilité que le saumon rouge du fleuve Fraser et les autres espèces de saumons du Pacifique soient exposés à la bactérie <i>Aeromonas salmonicida</i> disséminée à partir de fermes d'élevage contenant des saumons atlantiques contaminés ou malades dans la région des îles Discovery, compte tenu des pratiques d'élevage actuelles.	29
Tableau 13. Concentrations modélisées de la bactérie <i>Aeromonas salmonicida</i> (ufc/m ³) attribuables aux fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery.	36
Tableau 14. Facteurs contributifs et limitatifs de la probabilité que des saumons rouges du fleuve Fraser et d'autres espèces de saumons du Pacifique sensibles soient contaminés par la bactérie <i>Aeromonas salmonicida</i> disséminée à partir des fermes d'élevage contenant des saumons atlantiques infectés dans la région des îles Discovery, compte tenu des pratiques actuelles en matière de gestion de la santé du poisson.	38
Tableau 15. Sommaire des classement de probabilité et d'incertitude pour l'évaluation de la probabilité dans le cadre de l'évaluation du risque que pose <i>Aeromonas salmonicida</i>	40

Tableau 16. Estimation du risque pour l'abondance du saumon rouge du fleuve Fraser résultant de la présence de la bactérie <i>Aeromonas salmonicida</i> provenant des fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery, selon les pratiques actuelles de gestion des fermes.....	49
Tableau 17. Estimation du risque pour la diversité du saumon rouge du fleuve Fraser résultant de la présence de la bactérie <i>Aeromonas salmonicida</i> provenant des fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery, selon les pratiques actuelles de gestion des fermes.....	49
Tableau 18. Sommaire des fermes d'élevage de saumon atlantique actives, du nombre de vérifications effectuées et de diagnostics de la furunculose au niveau de la ferme, dans les fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery (zone de surveillance de la santé des poissons 3-2 et trois fermes à proximité dans la zone de surveillance de la santé des poissons 3-3), entre 2002 et 2016.	58
Tableau 19. Nombre de fermes d'élevage de saumon atlantique actives dans la région des îles Discovery et d'événements liés à la santé des poissons (ESP) attribués à la furunculose de 2002 à 2017.	59
Tableau 20. Sommaire des résultats du dépistage par l'industrie de la bactérie <i>Aeromonas salmonicida</i> par culture bactériologique, histologie ou réaction en chaîne de la polymérase (PCR) entre 2011 et 2017 dans les fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery.	60
Tableau 21. Estimation de la proportion de saumons rouges juvéniles du fleuve Fraser de type lacustre qui auraient pu être exposés à une ou plusieurs fermes d'élevage de saumon atlantique contaminées par <i>Aeromonas salmonicida</i> lors de leur migration à travers la région des îles Discovery entre 2002 et 2017.	63
Tableau 22. Estimation de la proportion de saumons rouges adultes du fleuve Fraser qui auraient pu être exposés à une ou plusieurs fermes d'élevage de saumon atlantique contaminées par <i>Aeromonas salmonicida</i> lors de leur migration à travers la région des îles Discovery entre 2002 et 2017.	65
Tableau 23. Probabilité d'exposition des saumons rouges juvéniles et adultes du fleuve Fraser à la bactérie <i>Aeromonas salmonicida</i> attribuable aux fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery pendant au moins quatre années consécutives sur une période représentant deux générations (huit ans).	68
Tableau 24. Comparaison des estimations de l'exposition d'après le processus binomial et la stratégie d'auto-amorçage (1 000 et 10 000 itérations).	68

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Emplacement des fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery (zone 3-2 et trois fermes d'élevage dans la zone 3-3) incluses dans la présente évaluation du risque.	3
Figure 2. Modèle conceptuel d'évaluation du risque pour le saumon rouge du fleuve Fraser résultant de la présence de la bactérie <i>Aeromonas salmonicida</i> attribuable aux fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery, en Colombie-Britannique.....	5
Figure 3. Matrice des risques pour combiner les résultats de l'évaluation de la probabilité et des conséquences sur l'abondance du saumon rouge du fleuve Fraser.	9
Figure 4. Matrice des risques pour combiner les résultats de l'évaluation de la probabilité et des conséquences sur la diversité du saumon rouge du fleuve Fraser.	9
Figure 5. Estimation de la concentration maximale de la bactérie <i>Aeromonas salmonicida</i> dans l'eau (ufc/m ³) dans une ferme d'élevage de saumon atlantique contaminée de la région des îles Discovery, en Colombie-Britannique.	35
Figure 6. Distribution modélisée de la concentration de la bactérie <i>Aeromonas salmonicida</i> dans les cinq premiers mètres pendant 60 jours d'excrétion continue en mai et juin dans la région des îles Discovery.....	37
Figure 7. Résultats potentiels de l'infection d'au moins un poisson sauvage sensible par la bactérie <i>Aeromonas salmonicida</i> disséminée à partir des fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery.	45
Figure 8. Distribution de probabilité cumulative complémentaire (CCDF) de l'exposition potentielle des saumons rouges juvéniles ou adultes du fleuve Fraser à des fermes d'élevage de saumon atlantique infectées par <i>Aeromonas salmonicida</i> dans la région des îles Discovery sur une période de huit ans.....	67
Figure 9. Modèle compartimenté, fréquence-dépendant, SEIR (Susceptible-Exposé-Infectieux-Rétablis) avec mortalité due à la maladie.....	69
Figure 10. Mortalité cumulée résultant de la propagation simulée de la bactérie <i>Aeromonas salmonicida</i> dans la population adulte de saumon rouge en montaison.	72

GLOSSAIRE

Aigu : Caractérisé par une progression courte et relativement grave.

Chronique : Maladie persistante ou de longue durée.

Clinique : Apparence externe d'une maladie dans un organisme vivant.

Éclosion : Apparition inattendue d'une maladie ou de mortalité.

Épisode de mortalité : Mortalité des poissons équivalente à 4 000 kg ou plus ou pertes atteignant 2 % de l'inventaire actuel de l'installation au cours d'une période de 24 heures; ou mortalité des poissons équivalente à 10 000 kg ou plus ou pertes atteignant 5 % sur une période de cinq jours.

Espèce vulnérable : Espèce chez laquelle la présence d'une infection a été démontrée par la survenue de cas spontanés ou par une exposition expérimentale à un agent pathogène simulant la voie naturelle d'infection.

Événement lié à la santé des poissons (ESP) : Éclosion de maladie, soupçonnée ou déclarée, dans une installation d'aquaculture, qui nécessite l'intervention d'un vétérinaire et toutes les mesures visant à réduire ou à atténuer l'incidence et le risque associés à l'événement.

Infection : Croissance de microorganismes pathogènes dans l'organisme, avec ou sans altération de fonction corporelle.

Maladie : État dans lequel la fonction normale ou la structure d'une partie du corps ou d'une fonction corporelle est altérée.

Mortalités fraîches : Poissons morts récemment.

Période d'incubation : Période entre l'infection et l'apparition des signes cliniques.

Période infectieuse : Période pendant laquelle les individus sont infectieux (c'est-à-dire qu'ils excrètent des organismes viables).

Porteur : Animal contaminé qui excrète des organismes pathogènes, mais ne présente aucun signe de maladie.

Pression d'infection : Concentration des agents pathogènes infectieux dans l'environnement des hôtes vulnérables.

Prévalence : Nombre d'hôtes infectés par un agent pathogène (*prévalence de l'infection*) ou affectés par une maladie (*prévalence de la maladie*), exprimé en pourcentage du nombre total d'hôtes dans une population à un moment donné.

Subclinique : Signes insuffisants pour causer une maladie classique identifiable.

Subléta : Insuffisant pour causer la mort.

Unité épidémiologique : Groupe d'animaux partageant approximativement le même risque d'exposition à un agent pathogène dans un lieu défini.

Unité formant des colonies (UFC) : Unité utilisée pour estimer le nombre de cellules bactériennes viables dans un échantillon, où la viabilité est évaluée comme la capacité à se multiplier sur un milieu de croissance artificiel (p. ex. une plaque de gélose).

Vecteur : Organisme vivant qui peut transmettre une maladie, directement de l'animal ou indirectement par les excréments de l'animal, à un autre animal (p. ex. personnel, faune).

Vecteur passif : Objet inanimé capable de transmettre une maladie (p. ex. filet ou bateau contaminé).

RÉSUMÉ

Pêches et Océans Canada (MPO), dans le cadre de l'Initiative des sciences de l'aquaculture pour l'évaluation des risques environnementaux, mène une série d'évaluations du risque pour le saumon rouge du fleuve Fraser (*Oncorhynchus nerka*) en raison du transfert d'agents pathogènes du saumon atlantique (*Salmo salar*) dans les fermes d'élevage de la région des îles Discovery, en Colombie-Britannique.

Le présent document constitue l'évaluation des risques pour le saumon rouge du fleuve Fraser attribuables à la bactérie *Aeromonas salmonicida* présente dans les fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery, en Colombie-Britannique, selon les pratiques d'élevage actuelles. L'évaluation du risque a été réalisée en trois grandes étapes : premièrement, une évaluation de la probabilité qui comporte quatre étapes d'évaluation consécutives (contamination à la ferme, dissémination des agents pathogènes, exposition des poissons sauvages sensibles et infection des poissons sauvages sensibles); deuxièmement, une évaluation des conséquences; et troisièmement, une estimation du risque qui combine les deux premières étapes.

La bactérie *A. salmonicida* est l'agent responsable de la furunculose. Elle est endémique à la Colombie-Britannique, où elle a été détectée à la fois chez le saumon sauvage et d'élevage. Si l'on se fonde sur les preuves de l'infection et de la présence de la maladie dans les fermes d'élevage de saumon atlantique entre 2002 et 2017, il est improbable, avec un degré de certitude raisonnable, que les saumons atlantiques élevés dans la région des îles Discovery soient contaminés par *A. salmonicida* au cours d'une année compte tenu des pratiques d'élevage actuelles. Toutefois, en cas d'infection, il est extrêmement probable, avec un degré de certitude élevé, que la bactérie soit disséminée dans le milieu marin par les saumons atlantiques d'élevage, puisqu'il est prouvé qu'ils peuvent l'excréter. Si l'on tient compte de la période de migration du saumon rouge du fleuve Fraser dans la région des îles Discovery et de la période de l'infection par *A. salmonicida* dans les fermes, il est probable qu'au moins un juvénile et un adulte, avec un degré de certitude raisonnable, soient exposés à la bactérie disséminée à partir des fermes contaminées pendant une année quelconque. Selon cette exposition, il est très improbable que des saumons rouges du fleuve Fraser soient contaminés par la bactérie *A. salmonicida* disséminée à partir des fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery compte tenu de la pression d'infection. Dans l'ensemble, la conclusion a été qu'il est très improbable que des saumons rouges du fleuve Fraser soient contaminés par la bactérie *A. salmonicida* disséminée à partir des fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery selon les pratiques actuelles de gestion de la santé du poisson.

Dans l'éventualité très improbable d'une infection de saumons rouges du fleuve Fraser par *A. salmonicida* attribuable à une ferme d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery, il a été déterminé que l'ampleur potentielle des conséquences d'une infection sur l'abondance et la diversité du saumon rouge du fleuve Fraser est négligeable : une infection contractée au stade de juvénile ne devrait pas se propager dans la population en mer et une infection contractée au stade d'adulte ne devrait pas avoir le temps de se propager avant que les poissons n'atteignent les frayères. En raison de lacunes importantes dans les connaissances, ces conclusions sont assorties d'un degré d'incertitude allant de raisonnable à élevée.

Dans l'ensemble, l'évaluation a permis de conclure que la bactérie *A. salmonicida* provenant des fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery pose un risque minime pour l'abondance et la diversité du saumon rouge du fleuve Fraser compte tenu des pratiques d'élevage actuelles. Il conviendrait de revoir la présente évaluation du risque à

mesure que les résultats de nouvelles recherches viendront combler les lacunes dans les connaissances.

1 INTRODUCTION

Pêches et Océans Canada (MPO) assume le rôle réglementaire d'assurer la protection de l'environnement tout en créant les conditions pour le développement d'un secteur de l'aquaculture durable sur les plans économique, social et environnemental, qui constitue une priorité pour la ministre des Pêches, des Océans et de la Garde côtière canadienne.

Il est reconnu qu'il existe des interactions entre les activités aquacoles et l'environnement (Grant et Jones, 2010; Foreman *et al.*, 2015). L'une de ces interactions est le risque de propagation possible, aux populations de saumons sauvages, de maladies infectieuses en provenance des fermes d'élevage de saumon atlantique (*Salmo salar*) situées en Colombie-Britannique (Cohen, 2012a).

La Division de la gestion de l'aquaculture du MPO a demandé un avis scientifique officiel sur le risque de transfert aux populations de poissons sauvages d'agents pathogènes à partir des fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery, en Colombie-Britannique. Étant donné la complexité des interactions entre les agents pathogènes, les hôtes et l'environnement, le MPO publie des avis scientifiques dans le cadre d'une série d'évaluations du risque propres aux agents pathogènes.

Le présent document évalue le risque que pose pour le saumon rouge du fleuve Fraser (*Oncorhynchus nerka*) la bactérie *Aeromonas salmonicida*, l'agent responsable de la furunculose, attribuable aux fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery, en Colombie-Britannique. Cet agent pathogène a été sélectionné pour faire l'objet d'une évaluation formelle du risque de transfert étant donné que la furunculose a été déclarée au niveau de la ferme dans des fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery.

Bien qu'il existe des rapports sur certaines souches atypiques de *A. salmonicida* provoquant la maladie chez les salmonidés dans de nombreux pays (Evelyn, 1971; Wiklund et Dalsgaard, 1998; Hiney et Olivier, 1999), la furunculose chez les saumons sauvages et élevés dans des parcs sur la côte Pacifique du Canada et des États-Unis a été principalement associée à la souche typique, *A. salmonicida* subsp. *salmonicida* (Kent, 1992; MacDiarmid, 1994). La présente évaluation du risque porte sur les souches typiques et atypiques.

Les risques posés aux autres populations de poissons sauvages et liés à d'autres exploitations aquacoles, agents pathogènes et régions de la Colombie-Britannique ne sont pas inclus dans la présente évaluation du risque.

2 CONTEXTE

La présente évaluation du risque est menée dans le cadre de l'Initiative des sciences de l'aquaculture pour l'évaluation des risques environnementaux (ci-après l'Initiative), mise en œuvre en tant qu'approche structurée pour fournir un avis scientifique axé sur les risques et ainsi mieux appuyer l'aquaculture durable au Canada. De plus, pour assurer l'uniformité des évaluations des risques effectuées dans le Cadre d'évaluation des risques environnementaux dans le domaine de l'aquaculture (ci-après le Cadre) décrit le processus et les composantes de chaque évaluation.

Le Cadre permettra de réaliser des évaluations du risque systématiques, structurées, transparentes et exhaustives. Il est conforme aux cadres internationaux et nationaux d'évaluation des risques (GESAMP, 2008; ISO, 2009) et comprend la définition des objectifs de protection et de gestion, la définition du problème, l'évaluation du risque et la production d'avis

scientifiques. Les objectifs de gestion et de protection et la définition du problème ont été élaborés en collaboration avec le Secteur des sciences des écosystèmes et des océans et le Secteur de la gestion des écosystèmes et des pêches du MPO, et approuvés par la Division de la gestion de l'aquaculture.

Le Cadre comporte aussi la communication des risques et un examen scientifique par les pairs par l'entremise du Secrétariat canadien de consultation scientifique (SCCS) du MPO, composé d'experts scientifiques internes et externes. Des renseignements détaillés au sujet de l'Initiative et du Cadre sont disponibles sur la [page Web de l'Initiative des sciences de l'aquaculture pour l'évaluation des risques environnementaux](#).

Les évaluations du risque effectuées dans le cadre de l'Initiative ne tiennent pas compte des considérations socioéconomiques et ne constituent pas des analyses coûts-avantages ou des analyses risques-avantages.

2.1 OBJECTIFS DE GESTION ET DE PROTECTION

Conformément aux recommandations relatives à l'aquaculture et à la santé du poisson formulées dans le rapport final de 2012 de la Commission d'enquête sur le déclin du saumon rouge du fleuve Fraser (Cohen, 2012a), le saumon rouge du fleuve Fraser est la composante valorisée de l'écosystème dans la présente évaluation des risques, et les objectifs de gestion et de protection visent à préserver son abondance et sa diversité.

2.2 DÉFINITION DU PROBLÈME

2.2.1 Détermination du danger

Dans la présente évaluation du risque, le danger est causé par la bactérie *A. salmonicida* (souches typiques et atypiques) provenant des fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery.

2.2.2 Caractérisation du danger

Boily *et al.* (2019) ont synthétisé les caractéristiques pertinentes de *A. salmonicida* et de la furunculose (par exemple, répartition de l'agent pathogène, virulence, survie dans le milieu marin, espèces sensibles, taux d'excrétion chez le saumon atlantique, doses infectieuses chez le saumon du Pacifique) et ont relevé les lacunes dans les connaissances pertinentes pour la présente évaluation du risque. L'examen comprend un sommaire de la présence de *A. salmonicida* et de la furunculose dans les fermes d'élevage de saumon atlantique en Colombie-Britannique. Le présent document donne d'autres détails propres aux fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery.

2.2.3 Portée

La présente évaluation vise à déterminer le risque associé aux pratiques d'élevage actuelles, y compris les exigences réglementaires et les pratiques volontaires décrites dans Wade (2017). Elle met l'accent sur le risque attribuable aux fermes d'élevage de saumon atlantique actives dans la région des îles Discovery (zone de santé des poissons 3-2) et aux environs immédiats (trois fermes dans la zone 3-3 au nord-ouest de la zone 3-2) [voir la Figure 1 et le Tableau 1], qui sont les mêmes 18 fermes que dans Mimeault *et al.* (2017).

D'autres fermes d'élevage de saumon atlantique situées le long des voies migratoires du saumon rouge du fleuve Fraser, comme celles de l'archipel Broughton, ne sont pas visées par la présente évaluation du risque.

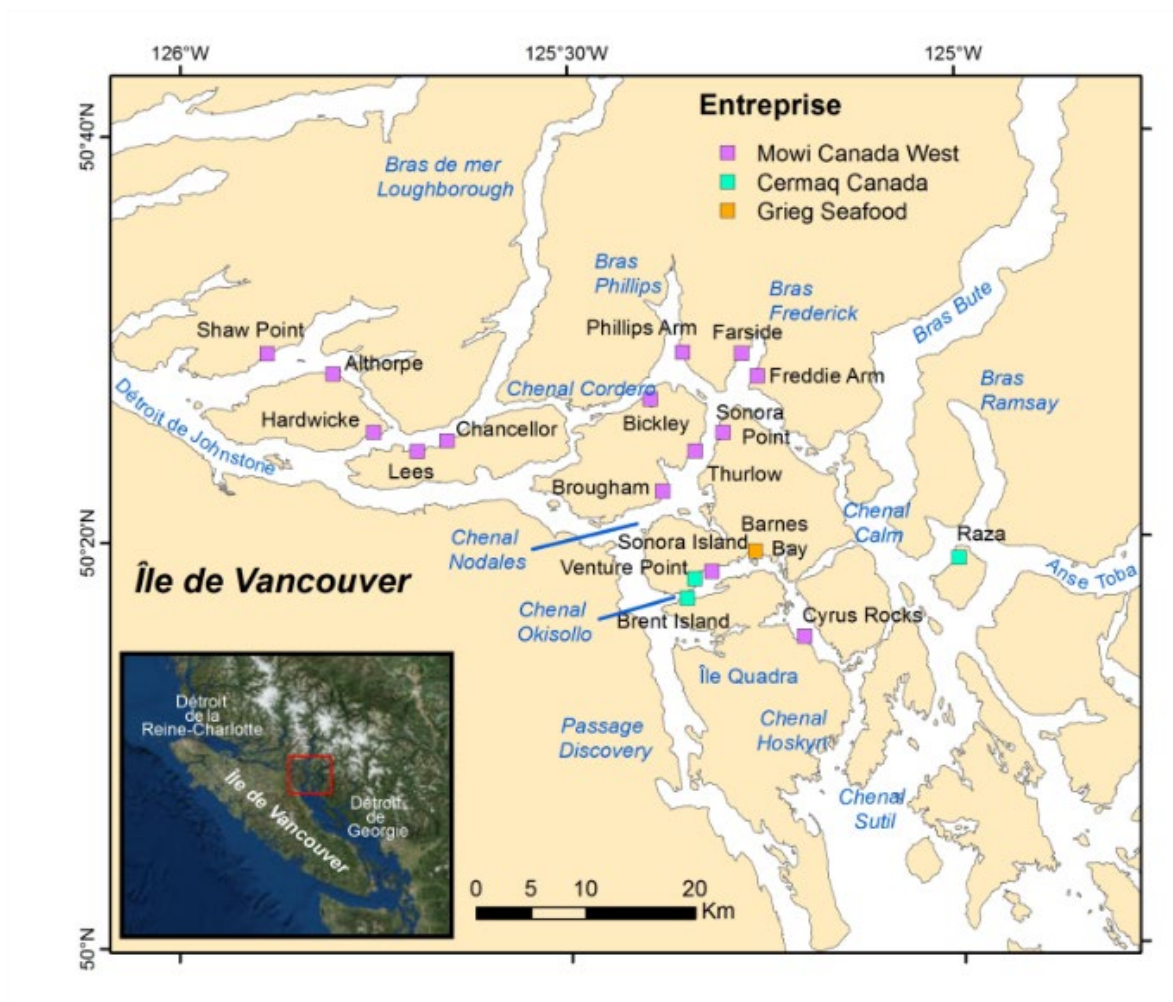


Figure 1. Emplacement des fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery (zone 3-2 et trois fermes d'élevage dans la zone 3-3) incluses dans la présente évaluation du risque. La taille des symboles pour les fermes piscicoles n'est pas à l'échelle. L'encart illustre l'emplacement de la région des îles Discovery, en Colombie-Britannique. Adapté de Mimeault et al. (2017).

Tableau 1. Liste des 18 fermes d'élevage de saumon atlantique actives incluses dans l'évaluation du risque.

Entreprise	Ferme	Zone de surveillance de la santé des poissons
Cermaq Canada	Brent Island	3-2
	Raza Island	3-2
	Venture	3-2
Grieg Seafood	Barnes Bay	3-2
Mowi Canada West (anciennement Marine Harvest Canada)	Althorpe	3-3
	Bickley	3-2
	Brougham Point	3-2
	Chancellor Channel	3-2
	Cyrus Rocks	3-2
	Farside	3-2
	Frederick Arm	3-2
	Hardwicke	3-3
	Lees Bay	3-2
	Phillips Arm	3-2
	Shaw Point	3-3
	Sonora Point	3-2
	Okisollo	3-2
	Thurlow	3-2

2.2.4 Question sur le risque

Quel risque pose, pour l'abondance et la diversité du saumon rouge du fleuve Fraser, le transfert de la bactérie *A. salmonicida* à partir des fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery, selon les pratiques d'élevage actuelles?

2.2.5 Méthodologie

La méthodologie est basée sur celle décrite dans Mimeault *et al.* (2017), qui a été adaptée des lignes directrices du MPO pour l'évaluation du risque biologique posé par les espèces aquatiques envahissantes au Canada (Mandrak *et al.*, 2012), sur l'analyse des risques liés à l'importation de l'Organisation mondiale de la santé animale (OIE, 2010), sur les recommandations pour les évaluations des risques en aquaculture côtière (GESAMP, 2008), et sur les directives de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture sur la compréhension et l'application de l'analyse des risques en aquaculture (FAO, 2008).

2.2.5.1 Modèle conceptuel

Le modèle conceptuel (Figure 2) est adapté de celui de Mimeault *et al.* (2017), dans lequel la probabilité qu'un événement se produise et l'ampleur des conséquences potentielles sont combinées dans une matrice des risques prédéfinie pour estimer le risque. La probabilité est évaluée en quatre étapes consécutives : une évaluation de l'infection à la ferme; une évaluation de la dissémination; une évaluation de l'exposition; et une évaluation de l'infection. L'évaluation des conséquences détermine l'ampleur potentielle des effets de l'infection par *A. salmonicida* provenant des fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery sur l'abondance et la diversité du saumon rouge du fleuve Fraser.

ÉVALUATION DE LA PROBABILITÉ

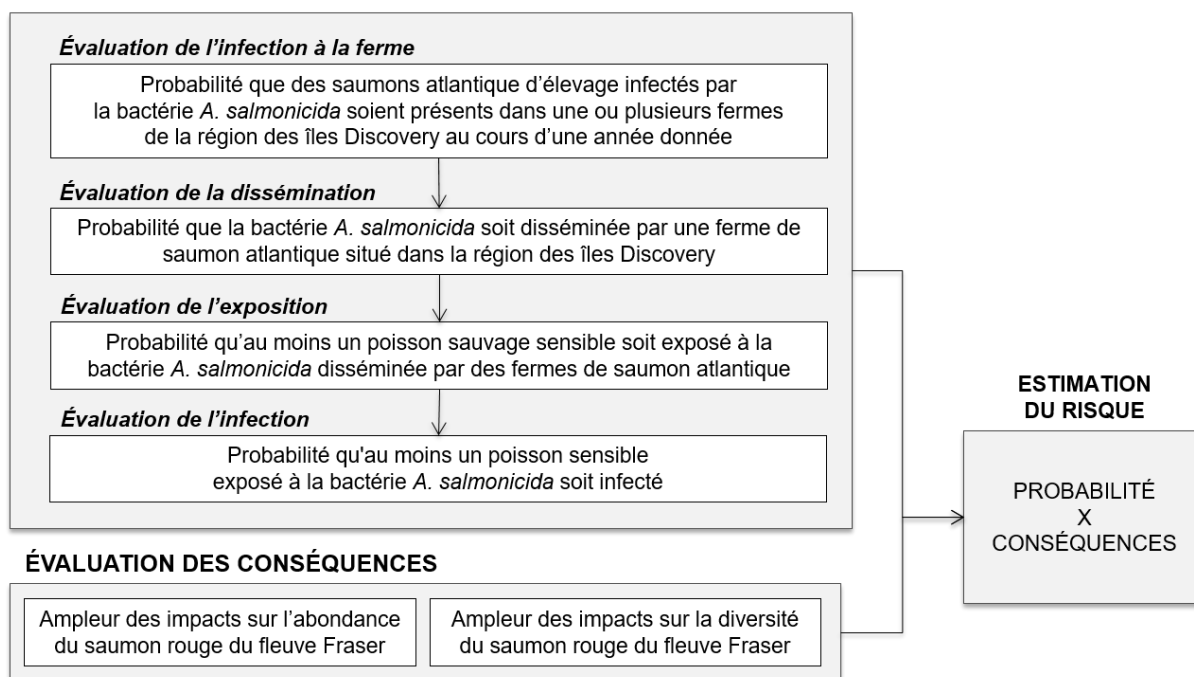


Figure 2. Modèle conceptuel d'évaluation du risque pour le saumon rouge du fleuve Fraser résultant de la présence de la bactérie *Aeromonas salmonicida* attribuable aux fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery, en Colombie-Britannique. Adapté de Mimeault et al. (2017).

2.2.5.2 Terminologie

Les catégories et définitions utilisées pour classer la probabilité (Tableau 2), les conséquences sur l'abondance (Tableau 3), les conséquences sur la diversité (Tableau 4), l'incertitude des données et de l'information (Tableau 5), et l'incertitude liée à la gestion de la santé des poissons (Figure 6) ont été adaptées de Mimeault et al. (2017).

Tableau 2. Catégories et définitions utilisées pour décrire la probabilité d'un événement sur une période d'un an. « Extrêmement improbable » est la probabilité la plus faible et « extrêmement probable », la probabilité la plus forte.

Catégories	Définitions
Extrêmement probable	On s'attend à ce que l'événement se produise; il se produira.
Très probable	Il est très probable que l'événement se produise.
Probable	Il est probable que l'événement se produise.
Improbable	Il est improbable que l'événement se produise; l'événement est peu probable, mais pourrait se produire.
Très improbable	Il est très improbable que l'événement se produise.
Extrêmement improbable	L'événement a peu ou pas de chance de se produire; insignifiant; négligeable.

Tableau 3. Catégories et définitions utilisées pour décrire les conséquences possibles sur l'abondance du saumon rouge du fleuve Fraser.

Catégories	Définitions
Négligeables	Réduction de 0 à 1 % du nombre de saumons rouges du fleuve Fraser en montaison
Mineures	Réduction de > 1 à 5 % du nombre de saumons rouges du fleuve Fraser en montaison
Modérées	Réduction de > 5 à 10 % du nombre de saumons rouges du fleuve Fraser en montaison
Majeures	Réduction de > 10 à 25 % du nombre de saumons rouges du fleuve Fraser en montaison
Graves	Réduction de > 25 à 50 % du nombre de saumons rouges du fleuve Fraser en montaison
Extrêmes	Réduction de > 50 % du nombre de saumons rouges du fleuve Fraser en montaison

Tableau 4. Catégories et définitions utilisées pour décrire les conséquences possibles sur la diversité du saumon rouge du fleuve Fraser. UC : Unité de conservation.

Catégories	Définitions
Négligeables	Variation de 0 à 1 % de l'abondance sur une génération et aucune perte d'UC de saumon rouge du fleuve Fraser en une génération.
Mineures	Réduction de > 1 à 10 % de l'abondance dans certaines UC qui n'entraînerait pas la perte d'une UC de saumon rouge du fleuve Fraser en une génération.
Modérées	Réduction de > 1 à 10 % de l'abondance dans la plupart des UC qui n'entraînerait pas la perte d'une UC de saumon rouge du fleuve Fraser en une génération OU Réduction de > 10 à 25 % de l'abondance dans une ou de plusieurs UC qui n'entraînerait pas la perte d'une UC de saumon rouge du fleuve Fraser en une génération.
Majeures	Réduction de > 25 % de l'abondance dans une ou plusieurs UC qui n'entraînerait pas la perte d'une UC de saumon rouge du fleuve Fraser en une génération.
Graves	Réduction de l'abondance qui entraînerait la perte d'une UC de saumon rouge du fleuve Fraser en une génération.
Extrêmes	Réduction de l'abondance qui entraînerait la perte de plus d'une UC de saumon rouge du fleuve Fraser en une génération.

Tableau 5. Catégories et définitions utilisées pour décrire le niveau d'incertitude associé aux données et aux renseignements.

Catégories	Définitions
Incertitude élevée	• Aucune donnée ou données insuffisantes. • Les données disponibles sont de mauvaise qualité. • Très grande variabilité intrinsèque. • Les conclusions des experts varient considérablement.
Incertitude raisonnable	• Les données disponibles sont limitées, incomplètes ou seulement des données de substitution. • Les données disponibles ne peuvent être présentées qu'avec des réserves importantes. • Variabilité intrinsèque importante. • Les experts ou les modèles arrivent à des conclusions différentes.
Certitude raisonnable	• Les données disponibles sont abondantes, mais non exhaustives. • Les données disponibles sont solides. • Faible variabilité intrinsèque. • Les experts ou les modèles sont généralement d'accord.
Certitude élevée	• Les données disponibles sont abondantes et exhaustives. • Les données disponibles sont solides, examinées par des pairs et publiées • Très faible variabilité intrinsèque. • Les experts ou les modèles sont d'accord.

Tableau 6. Catégories et définitions utilisées pour décrire le niveau d'incertitude associé à la gestion de la santé des poissons. « Quelques » et « la plupart » sont respectivement définis comme étant moins et plus de 50 % des données pertinentes.

Catégories	Définitions
Incertitude élevée	- Aucune des informations recueillies dans le cadre des pratiques de gestion des fermes, telles que précisées dans les plans de gestion de la santé des salmonidés, n'est disponible. - Divergence entre les informations et les données obtenues auprès des fermes et les vérifications effectuées dans les fermes, pour toutes les fermes. - Pratiques volontaires dans les fermes. - L'opinion des experts varie considérablement.
Incertitude raisonnable	- Certaines des informations recueillies dans le cadre des pratiques de gestion des fermes, telles que précisées dans les plans de gestion de la santé des salmonidés, sont disponibles. - Divergence entre les informations et les données obtenues auprès des fermes et les vérifications effectuées dans les fermes, pour la plupart des fermes - Pratiques volontaires des entreprises. - Les experts arrivent à des conclusions différentes.
Certitude raisonnable	- La plupart des informations recueillies dans le cadre des pratiques de gestion des fermes salmonicoles, telles que précisées dans les plans de gestion de la santé des salmonidés, sont disponibles. - Corroboration entre les informations et les données obtenues auprès des fermes et les vérifications effectuées dans les fermes, pour la plupart des fermes. - Pratiques volontaires à l'échelle de l'industrie, convenues au moyen d'un protocole d'entente ou d'une certification par une tierce partie reconnue. - Les experts sont généralement d'accord.
Certitude élevée	- Toutes les informations recueillies dans le cadre des pratiques de gestion des fermes, telles que précisées dans les plans de gestion de la santé des salmonidés, sont disponibles. - Corroboration entre les informations et les données obtenues auprès des fermes et les vérifications effectuées dans les fermes, pour toutes les fermes. - Pratiques obligatoires exigées par la loi et certification par une tierce partie reconnue. - Les experts sont d'accord.

2.2.5.3 Règles de combinaison

Comme le décrivent Mimeault *et al.* (2017), la combinaison des probabilités diffère si les événements sont dépendants ou indépendants : Un événement est dépendant si son issue dépend d'un autre événement. Par exemple, l'infection ne peut se produire que si l'exposition a eu lieu; par conséquent l'infection dépend de l'exposition. Les événements sont indépendants lorsque l'issue d'un événement n'a pas d'incidence sur celle des autres événements; par exemple, un agent pathogène peut être rejeté dans l'environnement par différentes voies non reliées.

Les probabilités sont combinées selon les méthodologies acceptées dans les évaluations qualitatives du risque en adoptant la valeur la plus basse (p. ex. faible) pour les événements dépendants et la valeur la plus forte (p. ex. élevée) pour les événements indépendants (Cox, 2008; Gale *et al.*, 2010; Cudmore *et al.*, 2012). Toutefois, lorsque les événements sont indépendants mais ne s'excluent pas mutuellement, c'est-à-dire qu'ils peuvent se produire simultanément, l'adoption de la probabilité individuelle la plus élevée pourrait sous-estimer la

probabilité globale. L'incertitude est indiquée individuellement pour chaque cote, sans combinaison.

2.2.5.4 Estimation du risque

Comme le décrivent Mimeault *et al.* (2017), deux matrices des risques ont été élaborées en collaboration avec le Secteur des sciences des écosystèmes et des océans et le Secteur de la gestion des écosystèmes et des pêches du MPO, afin de catégoriser les estimations du risque pour l'abondance (Figure 3) et la diversité (Figure 4) du saumon rouge du fleuve Fraser. Elles sont alignées sur l'échelle pertinente des conséquences sur la gestion des pêches et les objectifs stratégiques, sur les politiques existantes, et sur la tolérance actuelle au risque lié à la gestion en ce qui concerne les évaluations des risques.

Probabilité	Extrêmement probable						
	Très probable						
	Probable						
	Improbable						
	Très improbable						
	Extrêmement improbable						
		Négligeables	Mineures	Modérées	Majeures	Graves	Extrêmes
Conséquences sur l'abondance du saumon rouge du fleuve Fraser							

Figure 3. Matrice des risques pour combiner les résultats de l'évaluation de la probabilité et des conséquences sur l'abondance du saumon rouge du fleuve Fraser. Les couleurs vert, jaune et rouge représentent respectivement un risque minimal, modéré et élevé.

Probabilité	Extrêmement probable						
	Très probable						
	Probable						
	Improbable						
	Très improbable						
	Extrêmement improbable						
		Négligeables	Mineures	Modérées	Majeures	Graves	Extrêmes
Conséquences sur la diversité du saumon rouge du fleuve Fraser							

Figure 4. Matrice des risques pour combiner les résultats de l'évaluation de la probabilité et des conséquences sur la diversité du saumon rouge du fleuve Fraser. Les couleurs vert, jaune et rouge représentent respectivement un risque minimal, modéré et élevé.

3 ÉVALUATION DE LA PROBABILITÉ

L'évaluation de la probabilité consiste à déterminer la probabilité que le saumon rouge du fleuve Fraser soit contaminé par *A. salmonicida* provenant des fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery. Chaque étape de l'évaluation de la probabilité suppose que les pratiques de gestion actuelles des fermes d'élevage de saumon atlantique sont suivies et maintenues.

3.1 ÉVALUATION DE L'INFECTION À LA FERME

3.1.1 Question

Une année donnée, quelle est la probabilité que des saumons atlantiques d'élevage infectés par *A. salmonicida* soient présents dans une ou plusieurs fermes d'élevage de la région des îles Discovery?

3.1.2 Considérations

Les facteurs contribuant à la détection des infections par *A. salmonicida* dans les fermes d'élevage de saumon atlantique reposent sur des exigences réglementaires et sur les pratiques de l'industrie.

3.1.2.1 Exigences réglementaires

3.1.2.1.1 Exigences relatives aux permis

Depuis décembre 2010, le MPO est le principal responsable de la réglementation et de la gestion de l'aquaculture en Colombie-Britannique en vertu du *Règlement du Pacifique sur l'aquaculture* (RPA) pris aux termes de la *Loi sur les pêches*. Le MPO est ainsi chargé de délivrer les permis d'aquaculture pour les exploitations d'élevage de mollusques et de poissons en milieu marin et en eau douce en Colombie-Britannique.

Chaque ferme exploitée en Colombie-Britannique doit détenir un permis d'aquaculture de poissons marins en vertu du RPA, qui exige notamment un plan de gestion de la santé des salmonidés (PGSS) et des procédures opérationnelles normalisées (PON) internes connexes (MPO, 2015). Le PGSS décrit les concepts sanitaires et les éléments requis associés à un permis d'aquaculture de poissons marins (Wade, 2017), tandis que les PON qui l'accompagnent présentent en détail les procédures à suivre pour appliquer les concepts précis du PGSS, notamment la surveillance de la santé et des maladies des poissons (MPO, 2015; Wade, 2017).

Le section 2.5 du PGSS comprend les exigences relatives à l'exclusion des agents pathogènes (MPO, 2015), y compris la nécessité de prendre des précautions particulières pour éviter un stress indu des poissons et la transmission d'agents pathogènes.

3.1.2.1.2 Programme de vérification et de surveillance de la santé des poissons

Dans le cadre du Programme de vérification et de surveillance de la santé des poissons (PVSSP), des échantillons sont prélevés sur des poissons récemment morts afin de vérifier la surveillance et la déclaration de routine des maladies par les fermes (Wade, 2017). Les poissons moribonds peuvent aussi être échantillonnés (I. Keith, MPO, 103-2435, promenade Mansfield, Courtenay (Colombie-Britannique) V9N 2M2, comm. pers., 2018). Le MPO vise à vérifier 30 fermes d'élevage choisies au hasard par trimestre ou 120 fermes d'élevage par année (Wade, 2017).

Au cours d'une vérification, 30 poissons frais au maximum sont sélectionnés pour des analyses d'histopathologie, de bactériologie et de diagnostic moléculaire/virologie, mais dans la plupart des cas, les échantillonnages portent sur huit poissons frais (Wade, 2017). Les vétérinaires du MPO fournissent des diagnostics à l'échelle de la ferme en fonction d'une combinaison des antécédents de la ferme, des antécédents de traitement, des facteurs environnementaux, des dossiers de mortalité, des présentations cliniques à la ferme, et des résultats des procédures de diagnostic effectuées sur les différents poissons (MPO, 2018c).

Dans le cadre du PVSSP, la furunculose est diagnostiquée dans une population de saumon atlantique lorsque le site est en traitement pour la maladie ou lorsque les poissons échantillonnés présentent une septicémie avec des lésions histologiques caractéristiques, avec isolement ou identification de la bactérie causale dans les tissus et pertes au niveau de la population en raison de la maladie (I. Keith, MPO, comm. pers., 2018).

Boily *et al.* (2019) ont résumé les détections de *A. salmonicida* fondées sur des vérifications et sur les diagnostics de la furunculose au niveau de la ferme posés entre 2002 et 2016 en Colombie-Britannique. Des détails sur les détections et les diagnostics propres aux fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery se trouvent à l'annexe A. Pour résumer :

- Il n'y a pas eu de détection fondée sur des vérifications de la bactérie *A. salmonicida* par bactériologie ou histologie.
- Aucun diagnostic de furunculose au niveau de la ferme n'a résulté des vérifications.

Bien que le PVSSP du MPO ne soit pas conçu pour déterminer l'incidence ou la prévalence, les détections dénotent la présence de l'agent pathogène ou de la maladie chez certains poissons dans les fermes. Ces résultats indiquent que la bactérie *A. salmonicida* n'a pas été détectée dans les poissons échantillonnés.

Dans le cadre d'un projet de recherche, on a constaté des preuves moléculaires de la présence d'ADN génomique de la bactérie *A. salmonicida* dans des échantillons prélevés à des fins de vérification, entre avril 2011 et décembre 2013, dans des fermes d'élevage de saumon atlantique en Colombie-Britannique, y compris des fermes situées dans les zones de santé des poissons 3.2 et 3.3 (Laurin *et al.*, 2019).

3.1.2.1.3 Événements liés à la santé des poissons

Les événements liés à la santé des poissons (ESP) sont signalés au MPO par l'industrie. Dans MPO (2015), un ESP est défini comme suit : éclosion de maladie, soupçonnée ou déclarée, dans une installation d'aquaculture, qui nécessite l'intervention d'un vétérinaire et toutes les mesures visant à réduire ou à atténuer l'incidence ou le risque associés à l'événement. Lorsqu'un ESP se produit, le titulaire de permis doit prendre des mesures pour gérer l'événement, évaluer les mesures d'atténuation, et soumettre un avis d'ESP et les mesures de gestion thérapeutiques au Ministère (MPO, 2015).

La déclaration des ESP est obligatoire depuis l'automne 2002, à l'exception de 2013, 2014 et des trois premiers trimestres de 2015, au cours desquels les mortalités devaient être déclarées par cause (Wade, 2017). À l'époque, les ESP étaient encore signalés à la BC Salmon Farmers Association, mais leur déclaration au MPO n'était pas exigée dans les conditions de permis. La BC Salmon Farmers Association et l'industrie ont fourni les ESP survenus dans les fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery durant cette période afin de guider cette évaluation.

Au total, six ESP attribués à la furunculose ont été signalés dans un total de six fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery entre 2002 et 2017 (MPO, 2018b) [annexe B].

3.1.2.1.4 *Épisodes de mortalité*

Dans MPO (2015), un épisode de mortalité est défini comme suit : mortalité des poissons équivalente à 4 000 kg ou plus ou pertes atteignant 2 % de l'inventaire actuel de l'installation au cours d'une période de 24 heures; ou mortalité des poissons équivalente à 10 000 kg ou plus ou pertes atteignant 5 % sur une période de cinq jours. Les conditions de permis exigent la déclaration de tout épisode de mortalité au MPO au plus tard 24 heures après sa découverte, avec les détails suivants : nom de l'installation, nombre de poissons élevés, nombre de poissons morts, proportion touchée présumée, biomasse présumée des carcasses, cause probable et mesures prises (MPO, 2015).

Aucun épisode de mortalité attribué à la furunculose ou à une autre maladie infectieuse n'a été signalé dans les fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery entre 2011 et 2017. La déclaration des épisodes de mortalité était obligatoire avant 2011, mais les détails et les rapports ne sont pas disponibles (MPO, 2018a).

3.1.2.1.5 *Réglementation du déplacement des poissons vivants*

Le déplacement des animaux aquatiques vivants est réglementé par l'Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA) et le MPO. Les mesures de contrôle des déplacements contribuent à prévenir l'introduction d'agents pathogènes dans les sites d'élevage en mer et sont donc pertinentes pour déterminer la probabilité d'une infection par *A. salmonicida* dans les fermes d'élevage de saumon atlantique.

L'ACIA accorde des permis pour les déplacements d'animaux aquatiques à l'intérieur du pays afin de contenir certaines maladies à déclaration obligatoire des animaux aquatiques. La furunculose n'étant pas une maladie à déclaration obligatoire pour les poissons au Canada (CFIA, 2018a), cette forme de contrôle des déplacements n'est pas considérée plus avant.

Le MPO accorde des permis d'introduction et de transfert en vertu de l'article 56 du *Règlement de pêche (dispositions générales)*. Le Comité des introductions et des transferts (CIT) évalue les effets sur la santé, ainsi que les effets génétiques et écologiques, qui pourraient découler du transfert de poissons dans la province. En ce qui concerne l'industrie aquacole, le CIT évalue la santé des poissons à transférer, ce qui comprend la présence de maladies et d'agents responsables de maladies énumérés à l'annexe III du permis d'aquaculture des poissons marins délivré en vertu de la *Loi sur les pêches* (maladies d'intérêt régional, national ou international), de pair avec toute autre préoccupation qui pourrait surgir durant l'évaluation, y compris la présence de signes cliniques de la maladie bactérienne de la bouche rouge. Pour chaque demande de transfert liée à l'aquaculture, les rapports sur la santé des poissons et les dossiers d'élevage sont examinés par le personnel de la Division de la gestion de l'aquaculture avant le transfert. Si des signes cliniques de maladies sont observés ou s'il y a d'autres préoccupations, le CIT peut soit recommander que le transfert n'ait pas lieu, soit collaborer avec le demandeur pour s'assurer que le transfert est effectué de façon sécuritaire (M. Higgins, MPO, Station biologique du Pacifique, 3190, chemin Hammond Bay, Nanaimo (Colombie-Britannique) V9T 6N7, comm. pers., 2018). Un permis est requis pour chaque transfert.

Pour obtenir un permis d'aquaculture marine, les entreprises sont tenues de disposer de procédures opérationnelles normalisées pour le transfert des poissons entre les installations (MPO, 2015; Wade, 2017).

3.1.2.2 Pratiques de l'industrie

Trois entreprises élèvent des saumons atlantiques dans des sites marins de la région des îles Discovery : Cermaq Canada, Grieg Seafood et Mowi Canada West. Voir l'aperçu des pratiques de gestion de la santé dans les fermes salmonicoles de la Colombie-Britannique dans Wade (2017).

3.1.2.2.1 Surveillance et analyses

Chaque site actif de production marine est surveillé quotidiennement par le personnel formé sur place pour assurer la surveillance syndromique, au cours de laquelle les poissons morts sont retirés et classés. Le personnel est tenu d'alerter le vétérinaire en cas de signes d'agents pathogènes ou de maladies en particulier (Wade, 2017). En outre, toutes les entreprises procèdent régulièrement à des contrôles sanitaires de routine, au cours desquels les animaux morts récemment sont examinés pour rechercher des signes de maladies ou de conditions anormales. Au besoin, ces animaux sont aussi échantillonnés en vue de dépister des agents pathogènes selon la surveillance syndromique, les antécédents du site, les conditions environnementales, et le jugement professionnel du vétérinaire et de l'équipe responsable de la santé du poisson. La fréquence des contrôles sanitaires de routine et de l'échantillonnage pour le dépistage des agents pathogènes varie d'une entreprise à l'autre, comme il est décrit ci-après.

En plus de la surveillance quotidienne, chaque site actif de production marine de Cermaq Canada reçoit une visite du personnel de la santé du poisson ou du vétérinaire au moins une fois toutes les deux semaines pour confirmer la classification de la mortalité sur place et pour échantillonner jusqu'à cinq poissons moribonds ou morts récemment sans cause évidente de décès (p. ex. non performants, algues, manipulation, faible teneur en oxygène, matures, malformations). En plus de l'évaluation des lésions macroscopiques de tous les principaux systèmes d'organes, on congèle tous les tissus organiques de trois de ces poissons et les tissus rénaux combinés (jusqu'à cinq poissons) en vue d'une éventuelle soumission par le vétérinaire, en fonction des tendances de la mortalité ou des observations sur place. Pendant les six premières semaines suivant le transfert dans les sites de production marine, on échantillonne six poissons morts récemment par cage, toutes les deux semaines, pour effectuer des tests bactériologiques. Enfin, au moins une fois par trimestre, on pratique un test de réaction en chaîne par polymérase (PCR) sur des tissus rénaux combinés pour détecter le virus de la nécrose hématopoïétique infectieuse (NHI), le virus de la septicémie hémorragique virale (VSHV) et *Piscirickettsia salmonis*, de même qu'un examen histologique complet sur trois poissons (B. Milligan, Cermaq Canada, 203-919, Island Highway, Campbell River (Colombie-Britannique) V9W 2C2, comm. pers., 2018).

En plus de la surveillance quotidienne, chaque site actif de production marine de Grieg Seafood reçoit une visite du personnel de la santé du poisson ou du vétérinaire au moins une fois par trimestre, qui prélève au moins cinq poissons morts récemment pour des tests bactériologiques, histologiques et des dépistages par PCR (P. Whittaker et T. Hewison, Grieg Seafood, 1180, rue Ironwood, Campbell River (Colombie-Britannique) V9W 5P7, comm. pers., 2018).

En plus de la surveillance quotidienne, chaque site actif de production de Mowi Canada West reçoit une visite du personnel de la santé du poisson ou du vétérinaire au moins une fois par mois et au moins une fois par trimestre du vétérinaire. Des échantillons de mortalités fraîches ou de poissons morts récemment peuvent être prélevés pour le dépistage d'agents pathogènes selon la surveillance syndromique, les antécédents du site, les conditions environnementales, et le jugement professionnel du vétérinaire et de l'équipe responsable de la santé du poisson (D. Morrison, Mowi Canada West, 124-1334, Island Highway, Campbell River (Colombie-Britannique) V9W 8C9, comm. pers., 2018).

Le dépistage et les tests bactériologiques effectués par l'industrie ne se limitent pas à la surveillance de routine. D'autres raisons justifient les tests bactériologiques, notamment : la recherche et le développement; l'enquête sur les cas de mortalité; lorsque les cas de mortalité récents présentent des lésions macroscopiques compatibles avec un état systémique d'étiologie inconnue; ou à la demande du vétérinaire et de l'équipe chargée de la santé des poissons. La bactériologie est effectuée en interne à l'aide de méthodes de culture pour l'isolement bactérien. L'identification des agents pathogènes se fonde sur des sous-cultures et des tests supplémentaires effectués en interne ou par un laboratoire de diagnostic externe.

3.1.2.2.2 Déplacements des poissons vivants

À l'exception d'une ferme d'élevage, les saumoneaux ne sont pas transférés directement de l'eau douce dans les sites marins dans la région des îles Discovery en raison du risque d'infection par *Kudoa* sp., un parasite des poissons marins (Wade, 2017). L'empoissonnement direct a lieu à Raza, où *Kudoa* sp. n'a pas été un problème (D. New, Cermaq Canada, 203-919, Island Highway, Campbell River (Colombie-Britannique) V9W 2C2, comm. pers., 2018).

En Colombie-Britannique, tout déplacement de poissons vivants dans des installations de pisciculture nécessite un permis d'introduction et de transfert en vertu de l'article 56 du *Règlement de pêche (dispositions générales)*. La décision de délivrer un permis est axée sur les recommandations du Comité des introductions et des transferts (CIT) et prend en compte les résultats des évaluations sanitaires préalables au transfert, réalisées selon les pratiques exemplaires propres à chaque entreprise :

- Six à huit semaines avant chaque transfert de poissons vivants, Cermaq Canada effectue une bactériologie (n = 30) et une PCR pour détecter le virus de la nécrose hématopoïétique infectieuse (VNHI), le virus de la septicémie hémorragique virale (VSHV) et l'orthoréovirus pisciaire (sur des groupes de cinq poissons) sur 30 poissons moribonds. Une PCR est également effectuée pour détecter le virus de la nécrose pancréatique infectieuse (VNPI), le virus de l'anémie infectieuse du saumon (VAIS), *Renibacterium salmoninarum* avant les transferts de l'eau douce dans les installations d'eau de mer, ainsi que *Piscirickettsia salmonis* avant les transferts de l'eau de mer dans les installations en eau de mer.
- Trois semaines avant les transferts de poissons vivants, Grieg Seafood effectue une nécropsie générale (n = 30), une bactériologie (n = 30) et une PCR sur 30 poissons (six groupes de cinq poissons) de la sous-population (P. Whittaker et T. Hewison, Grieg Seafood, comm. pers., 2018).
- Avant tout transfert de poissons vivants, Mowi Canada West effectue des tests de bactériologie (n = 20), de virologie (quatre groupes de cinq poissons) et d'histologie (n = 5 à 10) sur 20 poissons morts récemment sélectionnés au hasard (D. Morrison, Mowi Canada West, comm. pers., 2018).

3.1.2.2.3 Vaccination

En Colombie-Britannique, la vaccination du saumon atlantique n'est pas une condition de permis et est donc volontaire (MPO, 2015; Wade, 2017). Trois vaccins sont actuellement autorisés contre la furonculose chez les salmonidés élevés au Canada (CFIA, 2018b). Les données sur l'efficacité des vaccins ne sont pas disponibles.

Cermaq Canada, Grieg Seafood et Mowi Canada West ont toujours vacciné, et continuent de le faire, tous les saumons atlantiques dans les éclosiers avec Forte Micro®, ou un équivalent commercial, pour prévenir la furonculose et la vibriose. Le vaccin Forte Micro® est considéré comme efficace chez les poissons d'élevage (P. Whittaker et T. Hewison, Grieg Seafood, comm. pers., 2018; D. Morrison, Mowi Canada West, comm. pers., 2018). Cependant, malgré

une couverture vaccinale à 100 %, la furonculose peut encore se développer dans des conditions de stress (manipulation et transfert entre sites) si des porteurs étaient présents dans la population avant la vaccination (B. Milligan, Cermaq Canada, comm. pers., 2018).

3.1.2.2.4 *Traitement*

Les options de traitement de la furonculose dans les écloséries et les sites de production marine peuvent varier d'une entreprise d'aquaculture à l'autre. Le traitement antibiotique administré dans les aliments est efficace pour réduire la mortalité liée à la furonculose; cependant, des poissons porteurs peuvent encore être présents dans la population après le traitement.

Cermaq Canada, Grieg Seafood et Mowi Canada West peuvent administrer aux poissons, dans les aliments, de l'oxytétracycline pendant 10 à 14 jours, du florfenicol pendant 10 jours, de la sulfadiazine/triméthoprime pendant 10 jours ou de la sulfadiméthoxine/ormétoprime pendant cinq jours lorsque des saumons atlantiques présentent des signes de furonculose dans les sites de production marine. Le choix de l'antibiotique dépend de la sensibilité de l'organisme et d'autres facteurs. La durée du traitement dépend du médicament prescrit, du jugement du vétérinaire et de la taille du poisson. Grieg Seafood et Mowi Canada West peuvent traiter ou abattre les stocks contaminés dans les écloséries, puis désinfecter et nettoyer les unités d'élevage (P. Whittaker et T. Hewison, Grieg Seafood, comm. pers., 2018; D. Morrison, Mowi Canada West, comm. pers., 2018).

3.1.2.3 **Détections par l'industrie**

D'après les résultats des observations et des tests menés par l'industrie dans les fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery entre 2011 et 2017, *A. salmonicida* a été détectée chez au moins un poisson dans 3,9 % des visites de sites visant la détection de la bactérie. Globalement, *A. salmonicida* a été détectée chez au moins un poisson dans deux fermes d'élevage en 2013, une ferme d'élevage en 2014 et une ferme d'élevage en 2017. L'industrie a signalé des souches typiques et atypiques. Voir l'annexe C pour obtenir plus de détails.

3.1.2.4 **Sommaire de la présence de la bactérie *Aeromonas salmonicida* et de la furonculose dans les fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery**

Dans la présente évaluation du risque, les preuves d'infections à *A. salmonicida* ou de furonculose font référence à des poissons échantillonnés lors de dépistages de routine effectués par l'industrie, de programmes réglementaires, d'événements liés à la santé des poissons ou de tout autre test diagnostique réalisé dans les fermes d'élevage avec (i) des échantillons où la présence de la bactérie *A. salmonicida* a été identifiée par des cultures bactériologiques ou par PCR ou (ii) une furonculose identifiée par histologie.

Le Tableau 7 résume les données relatives aux fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery, qui apportent des preuves d'infection par *A. salmonicida* ou de signes et de diagnostics de la furonculose, par année, entre 2002 et 2017. Les données ont été recueillies séparément des exigences réglementaires de déclaration (résultats émanant du PVSSP; événements liés à la santé des poissons et épisodes de mortalité déclarés par l'industrie au MPO) et des tests et des diagnostics effectués par l'industrie. Il est donc possible qu'une infection dans la même ferme d'élevage apparaisse dans plus d'une catégorie, de sorte qu'on ne peut pas se contenter d'ajouter le nombre d'exploitations entre les catégories ou les années.

On reconnaît que la présence d'un agent pathogène chez un poisson individuel n'entraîne pas toujours des signes cliniques ou la maladie dans une population. *Aeromonas salmonicida* n'a pas été détectée lors des vérifications, mais l'industrie l'a détectée et a signalé des traitements de la furonculose dans les fermes d'élevage.

Globalement, *A. salmonicida* a été déclarée six années (2003, 2009, 2010, 2013, 2014 et 2017) dans un total de sept fermes différentes entre 2002 et 2017. Des traitements contre la furonculose, y compris les événements liés à la santé des poissons, ont été signalés dans six fermes différentes.

Tableau 7. Nombre de fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery dans lesquelles on a trouvé des preuves d'infection par *Aeromonas salmonicida* ou de furunculose, résumé par année. Les données comprennent les résultats des tests par culture bactérienne ou réaction en chaîne de la polymérase (PCR) de l'industrie [2011-2017], les résultats basés sur les vérifications du Programme de vérification et de surveillance de la santé des poissons (PVSSP) [2002-2016], les événements liés à la santé des poissons (ESP) [2002-2017] et les épisodes de mortalité (2011-2016) déclarés par l'industrie à Pêches et Océans Canada (MPO). S. O. : données non disponibles. Les mois pour lesquels on dispose de preuves de la présence de la bactérie *A. salmonicida* ou de la furunculose sont ombrés et en gras.

Année	Nombre de fermes actives	Données de l'industrie	Données du PVSSP			Données déclarées par l'industrie au MPO	
		Nombre de fermes avec au moins un échantillon positif (culture, PCR) / nombre total de fermes testées	Nombre de fermes où <i>A. salmonicida</i> a été identifiée par bactériologie / nombre total de fermes ayant fait l'objet d'une vérification	Nombre de fermes où la furunculose a été identifiée par histologie / nombre total de fermes ayant fait l'objet d'une vérification	Nombre de fermes où on a diagnostiqué la présence de la furunculose au niveau de la ferme / nombre total de fermes ayant fait l'objet d'une vérification	Nombre de fermes présentant des ESP attribués à la furunculose	Nombre de fermes présentant des épisodes de mortalité attribués à la furunculose
2002	S. O.	S. O.	0/3	0/3	0/3	0	S. O.
2003	S. O.	S. O.	0/4	0/4	0/4	1	S. O.
2004	14	S. O.	0/9	0/9	0/9	0	S. O.
2005	15	S. O.	0/11	0/11	0/11	0	S. O.
2006	16	S. O.	0/12	0/12	0/12	0	S. O.
2007	16	S. O.	0/13	0/13	0/13	0	S. O.
2008	17	S. O.	0/15	0/15	0/15	0	S. O.
2009	18	S. O.	0/14	0/14	0/14	1	S. O.
2010	16	S. O.	0/4	0/4	0/4	2	S. O.
2011	17	0/11	0/8	0/8	0/8	0	0
2012	13	0/6	0/12	0/12	0/12	0	0
2013	8	2/7	0/7	0/7	0/7	1	0
2014	10	1/7	0/8	0/8	0/8	0	0
2015	10	0/6	0/9	0/9	0/9	0	0
2016	11	0/11	0/11	0/11	0/11	0	0
2017	12	1/10	S. O.	S. O.	S. O.	1	0

3.1.3 Hypothèses

- La détection positive de l'agent pathogène est une preuve de l'infection.
- Il est possible de regrouper les résultats des tests diagnostiques, quelles que soient les différences entre les méthodes employées et les caractéristiques de rendement des tests, pour indiquer la présence de l'agent pathogène dans les fermes.

3.1.4 Probabilité d'infection à une ferme

Le Tableau 8 présente les principaux facteurs contributifs et limitatifs de la probabilité qu'une infection par *A. salmonicida* se produise dans une ferme d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery. Ces facteurs ont servi à déterminer les cotes de probabilité et d'incertitude d'après les définitions des Tableau 2, Tableau 5 et Tableau 6.

Tableau 8. Facteurs contributifs et limitatifs de la probabilité que des saumons atlantiques d'élevage contaminés par Aeromonas salmonicida soient présents dans une ou plusieurs fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery selon les pratiques actuelles de gestion de la santé des poissons. ESP : événement lié à la santé des poissons; PGSS : Plan de gestion de la santé des salmonidés.

Facteurs contributifs	Facteurs limitatifs
• Le saumon atlantique est sensible à l'infection par <i>A. salmonicida</i>. • Des ESP attribués à la furunculose sont survenus en 2003, 2009, 2010, 2013 et 2017. • De 2002 à 2017, on a des preuves de la présence de <i>A. salmonicida</i> ou de la furunculose : ○ Au total, dans sept fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery. ○ Dans au moins une ferme d'élevage au cours de six années différentes (2003, 2009, 2010, 2013, 2014 et 2017). • Même avec une couverture vaccinale complète, la furunculose peut encore se développer dans certaines conditions, c'est-à-dire si des porteurs étaient présents dans la population avant la vaccination.	• Toutes les entreprises d'élevage de saumon atlantique réalisent des diagnostics pour détecter <i>A. salmonicida</i> par bactériologie avant tout transfert vivant. • Tous les saumons atlantiques élevés dans la région des îles Discovery sont vaccinés pour prévenir la furunculose. • <i>A. salmonicida</i> n'a pas été détectée et la furunculose n'a pas été diagnostiquée au niveau de la ferme lors des vérifications sanitaires des poissons (2002-2017) dans les fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery. • Le PGSS comprend des exigences visant à réduire au minimum le stress pendant le transfert, la manipulation et la récolte (MPO, 2015).

La conclusion a été que, pendant une année donnée, il est **improbable** que des saumons atlantiques d'élevage contaminés par *A. salmonicida* soient présents dans une ou plusieurs fermes de la région des îles Discovery compte tenu des pratiques d'élevage actuelles, puisque l'on a des preuves de la présence de *A. salmonicida* ou de la furunculose dans les fermes d'élevage au cours de six des seize années (2002 à 2017). Cette conclusion est assortie d'une **certitude raisonnable**, car les données sur le dépistage et les détections dans les fermes sont abondantes et solides, proviennent de différentes sources et s'échelonnent sur seize ans.

3.2 ÉVALUATION DE LA DISSÉMINATION

3.2.1 Question

Si l'on présume que des saumons atlantiques contaminés par *A. salmonicida* sont présents, quelle est la probabilité que *A. salmonicida* soit disséminée à partir d'une ferme d'élevage de saumon atlantique située dans la région des îles Discovery dans un environnement accessible aux populations de poissons sauvages?

3.2.2 Considérations

Les éléments à prendre en considération sont la méthode d'élevage du saumon atlantique, l'excrétion de *A. salmonicida* par les poissons contaminés, et les pratiques en matière de gestion de la santé du poisson.

3.2.2.1 Méthodes d'élevage du saumon atlantique

Les saumons atlantiques élevés dans des sites marins de la région des îles Discovery sont confinés dans des parcs en filet. Dans de telles conditions, l'eau traverse librement les parcs et aucun obstacle n'entrave les échanges d'agents pathogènes entre les parcs en filets et l'environnement (Johansen *et al.*, 2011).

3.2.2.2 Excrétion de la bactérie *Aeromonas salmonicida* par les poissons contaminés

Boily *et al.* (2019) ont passé en revue l'état des connaissances relatives à l'excrétion chez les poissons contaminés par *A. salmonicida*. La bactérie est excrétée à tous les stades de l'infection, y compris par les porteurs (Pérez *et al.*, 1996; Hiney et Olivier, 1999; Ogut, 2001), les poissons cliniquement contaminés (Rose *et al.*, 1989; Ogut, 2001) et les hôtes morts (McCarthy, 1977; Rose *et al.*, 1989; Enger *et al.*, 1992; Pérez *et al.*, 1996). Les taux d'excrétion ont été estimés en laboratoire chez le saumon atlantique (Rose *et al.*, 1989) et la truite arc-en-ciel (*O. mykiss*) contaminés par *A. salmonicida* (McCarthy, 1977; Pérez *et al.*, 1996).

Les taux d'excrétion dans l'eau de mer par le saumon atlantique contaminé par *A. salmonicida* sont les plus pertinents pour la présente évaluation du risque. Rose *et al.* (1989) ont testé des saumons atlantiques (25,8 g, n = 6) contaminés par *A. salmonicida* au moyen de l'immersion dans un bassin d'eau de mer, et ont signalé des taux d'excrétion médians de $1,7 \times 10^6$ ufc par poisson par heure chez les poissons récemment morts. Les mêmes auteurs ont également injecté *A. salmonicida* à des saumons atlantiques dans l'eau de mer et ont rapporté des taux médians d'excrétion de $1,3 \times 10^6$ ufc par poisson par heure chez des poissons vivants de 23 g (n = 4) un jour avant la mort et de $5,4 \times 10^7$ ufc par poisson par heure chez des poissons vivants de 1200 g (n = 2) le jour de la mort (fourchette : $9,0 \times 10^6$ à $6,4 \times 10^8$ ufc par poisson par heure).

Les taux d'excrétion chez les porteurs sains n'ont pas été indiqués jusqu'à présent.

3.2.2.3 Pratiques de gestion de la santé des poissons

Les conditions de permis imposent à toutes les entreprises de se conformer au plan de gestion de la santé des salmonidés (PGSS), qui comprend des mesures de biosécurité pour maintenir la santé des poissons, empêcher l'entrée d'agents pathogènes et limiter la propagation des maladies dans la ferme (MPO, 2015); certaines de ces mesures influenceront sur la probabilité que des agents pathogènes soient disséminés à partir d'une exploitation contaminée.

Le PGSS exige des procédures pour la collecte, la catégorisation, l'enregistrement, l'entreposage et l'élimination des carcasses de poisson (MPO, 2015). Plus précisément, des

procédures doivent être en place pour : le retrait régulier des poissons morts afin de les entreposer dans des contenants prévus à cet effet; la déclaration de la mortalité par catégorie au MPO; un emplacement sécurisé pour l'entreposage des poissons morts en attente d'un transfert vers les installations à terre; la prévention des fuites d'éléments dans les eaux réceptrices; le transfert sécurisé des poissons morts entreposés vers des installations à terre; et des méthodes de désinfection des contenants, du matériel et des autres installations ou bateaux utilisés pour la manutention (MPO, 2015). Le PGSS exige également une PON pour les éclosions de maladies des poissons ou les situations d'urgence, une éclosion étant définie comme une « apparition inattendue d'une maladie ou de mortalité » (MPO, 2015).

Le MPO indique si une PON est nécessaire et décrit l'objectif, mais ne prescrit pas comment les éléments du PGSS devraient être réalisés. Il revient donc à l'entreprise d'appliquer les concepts à la satisfaction du vétérinaire du MPO chargé de la santé des poissons (Wade, 2017). Par conséquent, on présume que, dans le cas des entreprises détenant un permis valide d'aquaculture des poissons, les PON présentées sont conformes aux conditions du permis et approuvées par le vétérinaire du MPO (Wade, 2017).

Des protocoles sont en place pour : la manipulation et l'entreposage des poissons morts; l'étiquetage, le nettoyage, la désinfection et l'entreposage des engins utilisés pour manipuler les poissons morts; restreindre le nombre de visiteurs, qui doivent obtenir une permission avant d'arriver sur les lieux; contrôler les visiteurs sur place au moyen de panneaux, de pédiluves et de vêtements de protection propres au site; des procédures pour laver les filets sans partager le matériel si possible, nettoyer et désinfecter le matériel après usage et pour le garder sec dans les endroits appropriés; nettoyer, désinfecter et transférer le gros équipement immergé entre sites; et la mise en place de mesures de biosécurité pour contrôler les déplacements des bateaux (Wade, 2017). Toutes les entreprises utilisent Virkon® Aquatic, un désinfectant à large spectre (Wade, 2017) qui s'est révélé efficace contre la furonculose (Fraser *et al.*, 2006).

Le respect de ces éléments est déterminé dans le cadre du PVSSP. En moyenne, moins d'une lacune par vérification a été signalée entre 2011 et 2015 dans les fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery (Wade, 2017). La plupart des lacunes signalées étaient liées aux protocoles de lutte contre le pou du poisson, au protocole de récupération des carcasses ou à la tenue incomplète des registres. Voir la ventilation détaillée des lacunes, par catégorie, dans Wade (2017).

3.2.3 Hypothèses

- Des saumons atlantiques contaminés par *A. salmonicida* sont présents dans au moins une ferme d'élevage.
- Les mesures de bioconfinement sont efficaces contre *A. salmonicida*.

3.2.4 Probabilité de dissémination

Le Tableau 9 présente les principaux facteurs contributifs et limitatifs à la probabilité de dissémination. Ces facteurs ont servi à déterminer les cotes de probabilité et d'incertitude d'après les définitions des Tableau 2, Tableau 5 et Tableau 6.

Tableau 9. Facteurs contributifs et limitatifs de la probabilité que la bactérie *Aeromonas salmonicida* se dissémine à partir de fermes d'élevage contenant des saumons atlantiques contaminés ou malades dans la région des îles Discovery, compte tenu des pratiques d'élevage actuelles.

Facteurs contributifs	Facteurs limitatifs
- Les saumons atlantiques contaminés peuvent excréter <i>A. salmonicida</i> dans l'eau de mer (Rose <i>et al.</i>, 1989). - La bactérie peut être excrétée à la plupart des stades de l'infection, y compris les porteurs ou les poissons présentant des signes d'infection subclinique, les poissons malades et les poissons morts. - Dans la région des îles Discovery, le saumon atlantique est élevé dans des parcs en filets, ce qui permet aux agents pathogènes, y compris <i>A. salmonicida</i>, d'être rejetés dans le milieu environnant à partir des fermes.	- Des protocoles sont en place pour la manipulation et l'entreposage des poissons morts; pour l'étiquetage, le nettoyage, la désinfection et l'entreposage des engins utilisés pour manipuler les poissons morts (Wade, 2017). - Des protocoles sont en place pour restreindre le nombre de visiteurs, qui doivent obtenir une permission avant d'arriver sur place, et pour contrôler les visiteurs sur place au moyen d'affiches, de pédiluves et de vêtements de protection propres au site (Wade, 2017). - Des protocoles sont en place pour réduire au minimum l'accès des prédateurs et de la faune (Wade, 2017). - Des protocoles sont en place pour des procédures pour laver les filets sans partager le matériel si possible, pour nettoyer et désinfecter le matériel après usage et pour le garder sec dans les endroits appropriés (Wade, 2017). - Des protocoles sont en place pour nettoyer, désinfecter et transférer le gros équipement immergé entre sites (Wade, 2017). - Des mesures de biosécurité sont en place pour contrôler le déplacement des navires (Wade, 2017). - En moyenne, moins d'une défaillance opérationnelle par vérification a été signalée entre 2011 et 2015 dans les fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery (Wade, 2017).

Deux voies de passage ont été prises en compte dans l'évaluation de la dissémination : 1) saumons atlantiques d'élevage contaminés; et 2) vecteurs mécaniques et vecteurs passifs.

3.2.4.1 Dissémination par le saumon atlantique d'élevage contaminé

La conclusion a été qu'il est **extrêmement probable** que *A. salmonicida* soit disséminée à partir d'une ferme d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery dans un environnement accessible aux populations de poissons sauvages par des saumons atlantiques d'élevage contaminés, compte tenu des pratiques actuelles de gestion de la santé des poissons, car les saumons atlantiques sont élevés dans des parcs en filet et il est prouvé qu'ils peuvent excréter la bactérie lorsqu'ils sont contaminés. Cette conclusion est assortie d'une

certitude élevée, car les preuves de l'excrétion de *A. salmonicida* par des salmonidés contaminés sont solides et abondantes, et ont fait l'objet d'un examen par des pairs.

3.2.4.2 Dissémination par vecteurs mécaniques et passifs

La conclusion a été qu'il est **improbable** que la bactérie *A. salmonicida* soit disséminée dans un environnement accessible aux populations de poissons sauvages par des vecteurs mécaniques ou des vecteurs passifs de transmission à partir d'une ferme d'élevage de saumon atlantique située dans la région des îles Discovery compte tenu des pratiques actuelles en matière de gestion de la santé du poisson. Cette conclusion s'accompagne d'un degré de **certitude raisonnable**, car les pratiques de biosécurité pertinentes font partie des exigences des permis et, en conséquence, sont précisées dans le Plan de gestion de la santé des salmonidés et les procédures opérationnelles normalisées. De plus, les taux de lacunes opérationnelles qui sont susceptibles de toucher la santé des poissons dans les fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery sont faibles.

3.2.4.3 Probabilité globale de dissémination

Nous avons déterminé la probabilité globale de dissémination en adoptant la plus forte probabilité parmi les voies de dissémination. Il est donc **extrêmement probable** que *A. salmonicida* se dissémine à partir d'une ferme d'élevage de saumon atlantique contaminé.

3.3 ÉVALUATION DE L'EXPOSITION

3.3.1 Question

Si l'on présume que *A. salmonicida* a été disséminée à partir d'au moins une ferme d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery, quelle est la probabilité qu'au moins un poisson sensible soit exposé à *A. salmonicida* une année donnée?

3.3.2 Considérations

L'évaluation de l'exposition consiste à déterminer la coïncidence spatiale et temporelle de l'agent pathogène libéré et d'espèces vulnérables (Taranger *et al.*, 2015).

Les éléments à prendre en considération sont : les espèces sensibles; la taille et le volume relatifs des fermes d'élevage de saumon atlantique; la présence de saumons rouges du fleuve Fraser dans la région des îles Discovery; la survie d'*A. salmonicida* dans le milieu marin; et le moment des infections par *A. salmonicida* dans les fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery.

3.3.2.1 Espèces sensibles

Toutes les espèces de salmonidés sont considérées comme sensibles à l'infection par *A. salmonicida* et à la furunculose (Kent, 2011). Bien que la sensibilité à l'infection soit la plus élevée chez le saumon atlantique et la truite brune (*S. trutta*), et la plus faible chez la truite arc-en-ciel (McCarthy, 1977; Cipriano et Heartwell, 1986; Bernoth, 1997; Hiney et Olivier, 1999; Roberts, 2012), aucune étude n'a comparé la sensibilité relative des espèces de saumons du Pacifique à celle du saumon atlantique en eau douce ou en eau de mer (Boily *et al.*, 2019). Les espèces de saumons du Pacifique sont donc considérées comme étant tout aussi sensibles à l'infection par *A. salmonicida* et à la maladie dans la présente évaluation du risque. Consulter Boily *et al.* (2019) pour obtenir plus de détails, notamment sur les espèces sensibles autres que les salmonidés qui ne sont pas incluses dans la présente évaluation du risque.

Boily *et al.* (2019) ont également examiné les études faisant état d'infections par *A. salmonicida* et du développement de maladies à différents stades du cycle biologique. Ils ont conclu que, bien que l'infection et la maladie puissent se produire à tous les stades du cycle biologique, les données sont insuffisantes pour attribuer différentes sensibilités aux différents stades biologiques du saumon du Pacifique.

Outre le saumon rouge, les autres espèces sensibles de saumons du Pacifique prises en compte dans la présente évaluation du risque sont le saumon chinook (*O. tshawytscha*), le saumon kéta (*O. keta*), le saumon coho (*O. kisutch*) et le saumon rose (*O. gorbuscha*).

3.3.2.2 Taille et volume des fermes d'élevage de saumon atlantique

Les fermes d'élevage de saumon atlantique occupent 0,007 % de la superficie et 0,0008 % du volume de la toute la région des îles Discovery (Mimeault *et al.*, 2017). Étant donné que la largeur du chenal dans la région des îles Discovery varie entre environ 850 et 3 200 mètres, une ferme de 100 m sur 100 m sur 20 m de profondeur s'étendrait sur environ 3 à 12 % de la largeur du chenal.

3.3.2.3 Saumon rouge du fleuve Fraser dans la région des îles Discovery

3.3.2.3.1 Juvéniles

Des saumons rouges juvéniles ont été trouvés dans la région des îles Discovery à plusieurs endroits différents, durant différentes études menées sur de nombreuses années (Levings et Kotyk, 1983; Brown *et al.*, 1984; Groot et Cooke, 1987; Neville *et al.*, 2013; Beacham *et al.*, 2014; Johnson, 2016; Neville *et al.*, 2016). D'après ces études, Grant *et al.* (2018) ont déterminé, en résumé, que les saumons rouges juvéniles du fleuve Fraser de type lacustre ont tendance à traverser la région des îles Discovery pendant leur migration entre la mi-mai et la mi-juillet, avec un pic de prises entre le début et le milieu du mois de juin.

Sur les six années pour lesquelles on dispose de preuves de la présence de la bactérie *A. salmonicida* ou de la furunculose dans les fermes d'élevage de saumon atlantique depuis 2002, la présence de l'agent pathogène a été signalée trois années pendant les mois de mai à juillet (Tableau 10 et Tableau 11).

3.3.2.3.2 Adultes

Pendant leur montaison, des saumons rouges adultes ont été capturés dans 98 % des calées des pêches expérimentales menées par la Commission du saumon du Pacifique dans la région des îles Discovery entre 2000 et 2015 (Grant *et al.*, 2018), ce qui prouve leur présence dans cette zone de la mi-juillet à la mi-septembre. Ensuite, en combinant le moment où le premier et le dernier saumon rouge adulte en montaison passent dans le bas Fraser à Mission, en Colombie-Britannique (à 60 km en amont de la sortie du Fraser vers le sud du détroit de Georgia) et la vitesse moyenne de nage et la distance par rapport aux limites nord-ouest et sud-ouest de la région des îles Discovery, Grant *et al.* (2018) ont estimé que pendant la montaison, les saumons rouges adultes du fleuve Fraser traversent la région des îles Discovery de juin à octobre.

Sur les six années pour lesquelles on dispose de preuves de la présence d'*A. salmonicida* ou de la furunculose dans les fermes d'élevage de saumon atlantique depuis 2002, la présence de l'agent pathogène a été prouvée les six années pendant les mois de juin à octobre (Tableau 10 et Tableau 11).

3.3.2.4 Autres espèces de saumons du Pacifique dans la région des îles Discovery

La présente section résume les renseignements disponibles sur la présence d'autres espèces de saumons du Pacifique dans la région des îles Discovery.

3.3.2.4.1 Juvéniles

Levings et Kotyk (1983) ont signalé des prises de saumons juvéniles lors de deux chalutages effectués de mars à août 1982 et en juin 1983 dans la zone des îles Discovery et les chenaux adjacents. Les prises étaient dominées par le saumon kéta; en 1982, l'abondance des saumons kétéas et roses a atteint son maximum à la fin du mois de juin. Le saumon chinook et le saumon coho étaient moins abondants, et le saumon rouge et la truite arc-en-ciel (*O. mykiss*) étaient peu communs (Levings et Kotyk, 1983). Seuls deux saumons rouges ont été signalés dans ce relevé. D'après les résultats de 1982, les saumons du Pacifique juvéniles (saumons chinooks, kétéas, cohos et roses) ont été principalement pêchés de la fin mai à la mi-juillet, mais certains poissons ont été capturés de la fin mars (saumon rose, $n = 7$) à la fin août (saumon chinook, $n = 1$ et saumon coho, $n = 1$).

Brown *et al.* (1987) ont compilé les prises de saumons du Pacifique juvéniles à la senne de plage dans plusieurs sites estuariens, de transition et marins le long du passage Discovery de mars 1982 à août 1986¹. Les captures ont varié au fil des ans, mais le saumon chinook a été principalement pêché entre mai et la mi-août (toutes les captures entre la mi-mars et le début septembre), le saumon kéta entre la mi-avril et la mi-juillet (toutes les captures entre la mi-mars et la fin août), le saumon coho entre la mi-mai et la mi-juin (toutes les captures entre la mi-avril et la fin août) et le saumon rose entre la mi-avril et le début juillet (toutes les captures entre la mi-mars et la mi-août). D'après cette étude, des saumons chinooks, kétéas, cohos ou roses juvéniles ont été capturés de la mi-mars au début septembre.

Bravender *et al.* (1999) ont échantillonné les saumons juvéniles à la senne de plage et à la senne coulissante dans le passage Discovery en 1996. Les échantillons ont été prélevés du 2 mai au 17 juillet. Les saumons roses et kétéas juvéniles étaient abondants dans les sennes de plage à l'extérieur de la marina pendant tout le mois de mai. Ils sont restés présents en nombre beaucoup plus faible jusqu'au début (saumon rose) et au milieu (saumon kéta) du mois de juillet (Bravender *et al.*, 1999). Les saumons chinooks juvéniles ont été recueillis du début mai à la mi-juillet, la majorité ayant été pêchés entre mai et la mi-juin. De petits nombres de saumons cohos juvéniles ont été capturés de la fin mai à la mi-juillet. Aucun saumon rouge n'a été pêché dans le cadre de cette étude.

Des échosondeurs ont été déployés dans le chenal Okisollo de la mi-mars à la mi-septembre en 2015 et 2016 (Rousseau *et al.*, 2017). D'après les données acoustiques, en 2015, des saumons juvéniles étaient présents sur le site 1 (pointe Venture, chenal Okisollo) de la mi-mai à la mi-juillet; après cette date, peu de signaux acoustiques peuvent être associés à des saumons du Pacifique juvéniles. En 2016, le nombre de saumons du Pacifique juvéniles est resté constamment élevé de la mi-mai à la mi-juin, mais contrairement à 2015, peu de signaux ont été enregistrés de la mi-juin jusqu'à la fin du déploiement (mi-septembre). Les deux années, la plupart des saumons du Pacifique juvéniles se trouvaient dans les cinq à six premiers mètres (Rousseau *et al.*, 2017).

¹ Voir plus de détails sur les périodes d'échantillonnage dans Brown *et al.* (1987). Pour résumer, des sorties ont été effectuées au moins une fois par mois de mars à décembre en 1982, de janvier à décembre en 1983, de janvier à septembre en 1984, en janvier et de mars à août en 1985, et d'avril à août en 1986.

3.3.2.4.2 Adultes

Des saumons chinooks, kétas, cohos, roses et rouges adultes ont été capturés dans le cadre de pêches expérimentales menées par la Commission du saumon du Pacifique dans la partie inférieure du détroit de Johnstone de juillet à septembre (2000-2015) (Grant *et al.*, 2018)]. Les captures quotidiennes par unité d'effort (CPUE) [compte moyen par calée $\pm$ ET] de saumon rouge ($7,4 \pm 8,3$ à $2\,544,2 \pm 3\,177,0$) et de saumon rose ($7,4 \pm 10,7$ à $1\,416,7 \pm 1\,665,6$) étaient supérieures à celles du saumon chinook ($0,6 \pm 0,6$ à $1,3 \pm 1,2$), du saumon kéta ($0,3 \pm 0,4$ à $5,8 \pm 12,2$) et du saumon coho ($0,2 \pm 0,2$ à $2,6 \pm 6,3$) toutes les années. Bien que des truites arc-en-ciel aient été signalées à l'occasion, les CPUE moyennes sont restées à zéro [examen dans Grant *et al.* (2018)]. Manzer (1955) a également signalé des prises de saumons roses en montaison dans le passage Discovery de juillet à septembre (et de très petits nombres en octobre).

3.3.2.4.3 Résumé

Dans l'ensemble, les espèces de saumons du Pacifique susmentionnées sont présentes dans la région des îles Discovery de la mi-mars à octobre. En outre, étant donné que le saumon chinook a tendance à résider dans les eaux côtières plus longtemps que les autres espèces (Zetterberg et Carter, 2010; Zetterberg *et al.*, 2012), il est raisonnable de supposer qu'il pourrait être présent dans la zone des îles Discovery à tout moment de l'année.

Il y a donc un chevauchement temporel entre les cinq espèces anadromes de saumons du Pacifique et les preuves de la présence d'*A. salmonicida* dans les fermes d'élevage de saumon atlantique des îles Discovery (Tableau 10 et Tableau 11).

3.3.2.5 Survie de la bactérie *Aeromonas salmonicida* dans le milieu marin

Boily *et al.* (2019) ont fait le point sur l'état des connaissances concernant la survie de la bactérie *A. salmonicida* dans l'environnement. Les études les plus pertinentes sur la survie dans le milieu marin sont présentées ici.

Il a été prouvé que la bactérie survit dans l'eau de mer (McCarthy, 1977; Rose, 1990; Rose *et al.*, 1990b; Effendi et Austin, 1991; Effendi et Austin, 1994). Des études basées sur la culture, menées dans de l'eau de mer non stérile, indiquent que la survie de la bactérie *A. salmonicida* varie entre deux et 26 jours environ (McCarthy, 1977; Rose, 1990; Rose *et al.*, 1990b; Effendi et Austin, 1994) en fonction des conditions expérimentales, notamment la température et la salinité.

Aeromonas salmonicida peut adhérer à différents substrats tels que le bois, le sable, la boue et les algues dans le milieu marin (Effendi et Austin, 1994). Dans des conditions expérimentales, la survie de la bactérie *A. salmonicida* fixée à ces substrats variait entre environ 6 et au moins 14 jours dans de l'eau de mer non stérile à 15 °C (Effendi et Austin, 1994).

En outre, on a constaté que la bactérie *A. salmonicida* survit dans les sédiments et peut être transportée par les fèces et les carcasses de poissons contaminés (Enger et Thorsen, 1992). Des études basées sur la culture, menées avec des sédiments dans de l'eau de mer non stérile, indiquent que la survie de la bactérie *A. salmonicida* varie entre environ 5 et 11 jours à 15 °C (Rose, 1990; Effendi et Austin, 1994).

3.3.2.6 Période de la présence de la bactérie *Aeromonas salmonicida* et de la furonculose dans les fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery

Le Tableau 10 résume les preuves de l'infection par *A. salmonicida* ou de la furonculose dans des fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery, par mois, entre 2002 et 2017 :

- D'après les résultats de la surveillance et du dépistage effectués par l'industrie (2011-2017), *A. salmonicida* a été détectée par culture ou PCR chez au moins un poisson dans au moins une ferme au cours des mois de février, juin, août, septembre et octobre.
- Il n'y a pas eu de détections d'*A. salmonicida* dans le cadre des vérifications et, par conséquent, aucun diagnostic de furonculose au niveau de la ferme lors des vérifications (2002-2016).
- Des événements liés à la santé des poissons qui ont été attribués à la furonculose ont été déclarés dans une ferme en janvier, février, avril à juin et octobre (2002-2016).
- Aucun épisode de mortalité (2011-2017) n'a été attribué à la furonculose.

Dans l'ensemble, si l'on se fonde sur toutes les sources de données entre 2002 et 2017, *A. salmonicida* a été signalée dans au moins une ferme d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery tous les mois sauf en mars, juillet, novembre et décembre. Il n'a pas été possible de mettre en évidence un profil saisonnier de l'infection ou de la maladie. Au moins quatre des six événements liés à la santé des poissons qui ont été attribués à la furonculose ont été signalés dans les trois mois suivant le transfert des poissons dans un site marin de la zone des îles Discovery. Le Tableau 11 résume toutes les preuves de la présence de *A. salmonicida* ou de la furonculose, par année et par mois, rapportées dans les fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery.

Tableau 10. Nombre de fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery dans lesquelles on a trouvé des preuves d'infection par *Aeromonas salmonicida* ou de furunculose, résumé par mois. « X » indique une preuve de la présence d'espèces de saumons du Pacifique au cours d'un mois donné; « SC » indique la présence présumée de saumons chinooks. Les données comprennent les résultats des tests par culture bactérienne ou réaction en chaîne de la polymérase (PCR) de l'industrie (2011-2017), les résultats basés sur les vérifications du Programme de vérification et de surveillance de la santé des poissons (PVSSP) [2002-2016], les événements liés à la santé des poissons (ESP) [2002-2017] et les épisodes de mortalité (2011-2017) déclarés par l'industrie à Pêches et Océans Canada (MPO). Les lettres, sur la première ligne du tableau, représentent les mois de l'année, de janvier à décembre. Les mois où des poissons sauvages étaient présents dans la région des îles Discovery et les mois pour lesquels on dispose de preuves de la présence de la bactérie *A. salmonicida* ou de la furunculose sont ombrés et en gras.

Présence dans la région des îles Discovery	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Saumon rouge juvénile du fleuve Fraser de type lacustre	-	-	-	-	X	X	X	-	-	-	-	-
Saumon rouge adulte du fleuve Fraser en montaison	-	-	-	-	-	X	X	X	X	X	-	-
Autres espèces de saumons du Pacifique	SC	SC	X	X	X	X	X	X	X	X	SC	SC
Preuve de la présence de la bactérie <i>A. salmonicida</i> ou de la furunculose	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Nombre de fermes ayant présenté au moins un échantillon positif par rapport au nombre total de fermes ayant fait l'objet de tests (données de l'industrie)	0/10	1/7	0/10	0/9	0/6	2/9	0/8	1/9	1/8	1/10	0/10	0/12
Nombre de fermes où la furunculose a été identifiée par histologie par rapport au nombre total de fermes ayant fait l'objet de vérifications (données de vérification)	0/14	0/11	0/5	0/14	0/10	0/10	0/12	0/14	0/11	0/16	0/13	0/10
Nombre de fermes où <i>A. salmonicida</i> a été identifiée par bactériologie par rapport au nombre total de fermes ayant fait l'objet d'une vérification (données de vérification)	0/14	0/11	0/5	0/14	0/10	0/10	0/12	0/14	0/11	0/16	0/13	0/10
Nombre de fermes dans lesquelles on a diagnostiqué la présence de la furunculose au niveau de la ferme par rapport au nombre total de fermes ayant fait l'objet d'une vérification (données de vérification)	0/14	0/11	0/5	0/14	0/10	0/10	0/12	0/14	0/11	0/16	0/13	0/10
Nombre de fermes où des événements liés à la santé des poissons ont été attribués à la furunculose (déclaration par l'industrie)	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0
Nombre de fermes où des épisodes de mortalité ont été attribués à la furunculose (déclaration par l'industrie)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 11. Nombre de fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery dans lesquelles on a trouvé des preuves de la présence de la bactérie *Aeromonas salmonicida* ou de furonculose, résumé par année et par mois. Les données comprennent les résultats des tests effectués par l'industrie (2011-2017) et du Programme de vérification et de surveillance de la santé des poissons (PVSSP) [2002-2016], les événements liés à la santé des poissons (2002-2017) et les épisodes de mortalité (ESP) [2002-2017]. Entre 2004 et 2017, le nombre de fermes actives de saumon atlantique a varié entre trois et 17 pour un mois donné (nombre de fermes actives non disponible pour 2002 et 2003). Les mois pour lesquels on dispose de preuves de la présence de la bactérie *A. salmonicida* ou de la furonculose sont ombrés et en gras.

Année	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
2002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2003	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2006	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2008	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2009	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
2010	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2012	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2013	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
2014	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
2015	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2016	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2017	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0

3.3.3 Hypothèses

- La bactérie *A. salmonicida* a été disséminée à partir d'au moins une ferme d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery.
- Les détections positives de la bactérie *A. salmonicida* prouvent que l'agent pathogène est présent dans les poissons échantillonnés.
- Les poissons contaminés par *A. salmonicida* excrètent la bactérie.
- Les preuves de l'excrétion sont limitées aux mois pour lesquels on dispose de preuves de l'infection ou de la maladie dans les fermes.
- Le saumon du Pacifique peut utiliser tous les chenaux de la région des îles Discovery.
- Le saumon rouge sauvage et le saumon rouge issu de la mise en valeur ne sont pas différenciés aux fins de la présente évaluation du risque.

3.3.4 Probabilité d'exposition

Le Tableau 12 présente les principaux facteurs contributifs et limitatifs de la probabilité que les espèces de saumons du Pacifique soient exposées à *A. salmonicida* provenant des fermes

d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery. Ces facteurs ont servi à déterminer les cotes de probabilité et d'incertitude d'après les définitions des Tableau 2, Tableau 5 et Tableau 6.

Tableau 12. Facteurs contributifs ou limitatifs de la probabilité que le saumon rouge du fleuve Fraser et les autres espèces de saumons du Pacifique soient exposés à la bactérie Aeromonas salmonicida disséminée à partir de fermes d'élevage contenant des saumons atlantiques contaminés ou malades dans la région des îles Discovery, compte tenu des pratiques d'élevage actuelles.

Facteurs contributifs	Facteurs limitatifs
- Des millions de saumons rouges du fleuve Fraser, juvéniles et adultes, migrent chaque année à travers la région des îles Discovery [examen dans Grant <i>et al.</i> (2018)]. - Le saumon rouge du fleuve Fraser et les autres espèces de saumons du Pacifique chevauchent dans le temps et l'espace la présence de la bactérie <i>A. salmonicida</i> dans les fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery. - Des études basées sur la culture, menées dans de l'eau de mer non stérile, ont indiqué que la bactérie <i>A. salmonicida</i> peut survivre de trois à 26 jours (McCarthy, 1977; Rose <i>et al.</i>, 1990b; Effendi et Austin, 1991; Effendi et Austin, 1994). - La transmission hydrodynamique de la bactérie <i>A. salmonicida</i> dans l'eau de mer a été signalée entre les cages d'une ferme d'élevage de saumon atlantique en Irlande (Smith <i>et al.</i>, 1982) et indiquée dans la modélisation du suivi des particules dans un hypothétique loch marin (Rose, 1990).	- Il n'y a pas de fermes d'élevage de saumon atlantique dans tous les chenaux de la région des îles Discovery. - Les fermes d'élevage de saumon atlantique occupent une surface et un volume relativement faibles dans la région des îles Discovery (Mimeault <i>et al.</i>, 2017). - Les vérifications de la santé des poissons n'ont jamais permis de diagnostiquer la furunculose au niveau de la ferme, ni de la signaler chez des poissons individuels par histologie, ni de détecter <i>A. salmonicida</i> dans les carcasses échantillonnées dans les fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery (MPO, 2018c).

La présente évaluation des risques a pris en compte trois groupes d'exposition (les saumons rouges du fleuve Fraser juvéniles, les saumons rouges du fleuve Fraser adultes et d'autres espèces sensibles) et une voie d'exposition (exposition dans le milieu aqueux).

La probabilité qu'au moins un poisson sensible soit exposé à *A. salmonicida* disséminée à partir d'une ferme d'élevage de saumon atlantique a été calculée en divisant le nombre d'années pour lesquelles on dispose de preuves de la présence de la bactérie ou de la maladie pendant la période au cours de laquelle des poissons sensibles sont présents dans la région, par le nombre d'années pour lesquelles on dispose de preuves de la présence de la bactérie *A. salmonicida* ou de la furunculose (six ans; voir le Tableau 11).

3.3.4.1 Exposition du saumon rouge juvénile du fleuve Fraser

La conclusion a été qu'il est **probable** qu'au moins un saumon rouge juvénile du fleuve Fraser puisse être exposé à *A. salmonicida* provenant des fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery en raison d'une exposition par l'eau, selon les pratiques actuelles de gestion de la santé des poissons, étant donné leur chevauchement temporel avec les déclarations de la bactérie *A. salmonicida* dans les fermes. Sur les six

années pour lesquelles on dispose de preuves de la présence de la bactérie *A. salmonicida* ou de la furonculose dans les fermes depuis 2002, les preuves pour trois années couvrent la période entre mai et juillet, qui correspond au moment où les saumons rouges juvéniles du fleuve Fraser devraient être présents dans la région des îles Discovery (Tableau 11). Cette conclusion s'assortit d'une **certitude raisonnable** compte tenu des données abondantes et solides documentant la présence de saumons rouges juvéniles dans la zone des îles Discovery et la présence de la bactérie *A. salmonicida* et de la furonculose dans les fermes d'élevage de saumon atlantique dans cette zone.

3.3.4.2 Exposition du saumon rouge adulte du fleuve Fraser

La conclusion a été qu'il est **probable** qu'au moins un saumon rouge adulte du fleuve Fraser puisse être exposé à *A. salmonicida* provenant des fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery en raison d'une exposition par l'eau, selon les pratiques actuelles de gestion de la santé des poissons, étant donné leur chevauchement temporel avec les déclarations de la bactérie *A. salmonicida* dans les fermes. Sur les six années pour lesquelles on dispose de preuves de la présence de la bactérie *A. salmonicida* ou de la furonculose dans les fermes depuis 2002, les preuves pour trois années couvrent la période entre juin et octobre, qui correspond au moment où les saumons rouges adultes du fleuve Fraser devraient être présents dans la région des îles Discovery (voir le Tableau 11). Cette conclusion s'assortit d'une **certitude raisonnable** compte tenu des données abondantes et solides documentant la présence de saumons rouges adultes dans la zone des îles Discovery et la présence de la bactérie *A. salmonicida* et de la furonculose dans les fermes d'élevage de saumon atlantique dans cette zone.

3.3.4.3 Exposition des autres espèces de saumons du Pacifique sensibles

La conclusion a été qu'il est **extrêmement probable** qu'au moins une autre espèce de saumon du Pacifique sensible soit exposée par l'eau à la bactérie *A. salmonicida* disséminée à partir d'une ferme d'élevage de saumon atlantique située dans la région des îles Discovery compte tenu des pratiques actuelles de gestion de la santé des poissons, étant donné le chevauchement temporel dans la région des îles Discovery, car certaines de ces espèces peuvent se trouver dans la région à tout moment de l'année. Cette conclusion est assortie d'une **incertitude raisonnable**, car on manque de données pour confirmer la présence de ces espèces dans la région des îles Discovery à tout moment de l'année, mais il existe des données solides et abondantes sur la présence de la bactérie *A. salmonicida* et de la furonculose dans les fermes d'élevage de saumon atlantique.

3.4 ÉVALUATION DE L'INFECTION

3.4.1 Question

En supposant qu'au moins un poisson sauvage sensible a été exposé à *A. salmonicida* rejetée par une ou des fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery, quelle est la probabilité qu'au moins un soit contaminé?

3.4.2 Considérations

Les éléments à prendre en considération sont les conditions océanographiques et environnementales, les doses infectieuses et létales minimales, la durée estimée de l'exposition, l'efficacité du vaccin, la mortalité attribuable à la furonculose dans les fermes d'élevage de saumon atlantique, et la pression d'infection estimée des fermes.

3.4.2.1 Conditions océanographiques et environnementales

La température enregistrée de l'eau dans la région des îles Discovery varie entre 3 et 24 °C selon les saisons et les régions (Chandler *et al.*, 2017). La température mensuelle moyenne de l'eau dans les 15 premiers mètres des fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery s'échelonne de $7,6 \pm 2,3$ °C à $11,5 \pm 3,3$ °C (Chandler *et al.*, 2017). Les températures de l'eau dans la région des îles Discovery sont adaptées à la viabilité de la bactérie *A. salmonicida* avec une survie allant d'environ trois à 26 jours dans une eau de mer non stérile de 11 à 15 °C (McCarthy, 1977; Rose *et al.*, 1990b, a; Effendi et Austin, 1994).

La salinité de l'eau dans la région des îles Discovery varie considérablement, de presque 0 à 32, selon la saison (en raison du ruissellement de la fonte des neiges), la profondeur (en raison de la circulation estuarienne) et l'emplacement (le mélange vertical étant excellent dans certains chenaux étroits). La salinité mensuelle moyenne mesurée dans les 15 premiers mètres des fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery s'échelonne de $28,9 \pm 7,3$ à $29,9 \pm 8,7$ (Chandler *et al.*, 2017). Les salinités dans la région des îles Discovery sont adaptées à la viabilité de la bactérie *A. salmonicida* avec une survie allant d'environ deux à 26 jours dans une eau de mer non stérile de 23 à 35 ppm (Lund, 1967; McCarthy, 1977; Rose *et al.*, 1990b, a; Effendi et Austin, 1994).

3.4.2.2 Doses infectieuses et létales minimales

Les doses minimales nécessaires pour provoquer une infection ou une mortalité par *A. salmonicida* chez le saumon rouge n'ont pas été déterminées (Boily *et al.*, 2019). En l'absence de doses minimales, nous avons utilisé les concentrations et durées de bain les plus faibles ayant causé une infection et une mortalité chez le saumon rouge comme données de substitution pour les doses infectieuses et létales minimales, respectivement.

McCarthy (1983) est la seule étude de laboratoire qui présente la virulence de la bactérie *A. salmonicida* par provocation en bassin chez le saumon rouge. Une immersion de 20 minutes des alevins (5,7 g, n = 21) dans de l'eau douce contenant 1×10^4 ufc/mL (1×10^{10} ufc/m³) d'*A. salmonicida* (souche AS-1) a entraîné une mortalité de 76 %. Il s'agit de la plus faible dose létale documentée de la bactérie *A. salmonicida* chez le saumon rouge.

Toutefois, la plus faible concentration d'*A. salmonicida* (souche 423) déclarée comme ayant causé la mortalité chez des salmonidés a été observée chez le saumon atlantique (75 à 115 g, n = 10) exposé à 10^2 ufc/mL (1×10^8 ufc/m³) de la bactérie *A. salmonicida* dans l'eau de mer 12 heures par jour pendant 21 jours (Rose *et al.*, 1989). Dans cette étude, l'exposition pendant 21 jours a entraîné une mortalité de 20 %, mais l'exposition pendant sept jours n'a pas entraîné de mortalité, ni d'infection (Rose *et al.*, 1989). Par conséquent, selon les études disponibles, on peut s'attendre à ce que la dose infectieuse la plus faible dans l'eau de mer pour le saumon atlantique soit supérieure à 10^2 ufc/mL (1×10^8 ufc/m³) de la bactérie *A. salmonicida* avec une exposition quotidienne de douze heures pendant sept jours.

3.4.2.3 Durée estimée de l'exposition

La durée potentielle d'exposition d'une espèce de poisson sensible à *A. salmonicida* disséminée à partir d'une ferme d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery dépend : (i) du temps que le poisson sensible passe dans la zone et (ii) de la durée de l'infection par *A. salmonicida* et de la furonculose dans les fermes d'élevage de saumon atlantique de cette zone.

3.4.2.3.1 Temps passé par les espèces sensibles dans la région des îles Discovery

Grant *et al.* (2018) ont estimé qu'un saumon rouge juvénile passe de cinq à quatorze jours dans la région des îles Discovery et un adulte, trois jours. Les fermes d'élevage de saumon atlantique sont situées dans des chenaux d'une partie de l'ensemble de la zone. La longueur totale de la région des îles Discovery est d'environ 140 km, les fermes étant réparties sur environ 75 km. En supposant une vitesse de migration constante et des déplacements unidirectionnels, Mimeault *et al.* (2017) ont alors estimé que les juvéniles pouvaient se trouver à proximité des fermes pendant trois à huit jours et les adultes pendant deux jours lorsqu'ils traversent la région durant la montaison.

Dans une étude de télémétrie réalisée en 2017, le temps de déplacement médian des saumons rouges juvéniles du fleuve Fraser (essentiellement du lac Chilko) dans les chenaux Hoskyn et Okisollo (Figure 1) était d'environ 30 heures et le temps de déplacement entre l'est et l'ouest du chenal Okisollo, d'environ 6 heures (Rechisky *et al.*, 2018). Dans la même étude, des récepteurs ont également été déployés dans deux fermes de saumon en jachère pour mesurer le temps d'exposition du saumon rouge dans une région où se trouvent des fermes d'élevage de saumon. Le temps médian passé par les saumons rouges juvéniles près des différentes fermes d'élevage de saumon était d'environ 4,5 minutes, ce qui laisse supposer une courte durée d'exposition aux fermes en jachère (Rechisky *et al.*, 2018).

À ce jour, on ignore le temps de séjour des autres espèces de saumons du Pacifique à proximité des fermes d'élevage de saumon de la région des îles Discovery.

3.4.2.3.2 Durée de l'infection par *Aeromonas salmonicida* et la furonculose dans les fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery

Bien que des poissons contaminés par *A. salmonicida* ou diagnostiqués avec la furonculose aient été trouvés dans des fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery, il n'existe pas d'estimation de la prévalence de l'infection par *A. salmonicida* dans la population. La durée du traitement contre la furonculose dans les fermes d'élevage de saumon atlantique varie entre 10 et 14 jours.

3.4.2.4 Efficacité des vaccins

Forte Micro®, ou son équivalent commercial, est le principal vaccin commercial utilisé dans les fermes d'élevage de saumon atlantique en Colombie-Britannique pour prévenir la furonculose chez les salmonidés. Bien qu'aucune donnée sur l'efficacité ne soit disponible, Forte Micro® est considéré comme efficace par les entreprises opérant dans la région des îles Discovery (Boily *et al.*, 2019). Toutefois, malgré une couverture vaccinale de 100 % du saumon atlantique en éclosérie, la furonculose peut encore se développer dans des conditions de stress (c'est-à-dire lors de la manipulation, du transfert entre sites, d'un stress environnemental, etc.) si les porteurs étaient déjà présents dans la population avant la vaccination, si l'immunocompétence est compromise (p. ex. stress) ou si le vaccin n'est pas totalement efficace. Comme il est résumé dans Boily *et al.* (2019), les formulations injectables préparées à partir de vaccin bactérien à souche entière de la bactérie *A. salmonicida* avec un adjuvant à base d'huile sont très efficaces, mais ne peuvent être administrées aux très petits poissons (Midtlyng, 1997; USDA, 2014). De ce fait, les jeunes saumons exposés à *A. salmonicida* à l'éclosérie peuvent contracter l'infection avant la vaccination et risquent de développer une furonculose ou une infection cachée et être porteurs de l'agent pathogène lorsqu'ils sont transférés dans un site de grossissement en mer (Munro et Waddell, 1984; Hiney, 1995).

3.4.2.5 Mortalité due à la furonculose dans les fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery

La mortalité attribuable à la furonculose dans les fermes d'élevage de saumon atlantique a été estimée d'après les données fournies par l'industrie. Nous avons utilisé la mortalité quotidienne et la cause de la mortalité au niveau du parc en filet pendant les trois mois précédant le premier jour du traitement et jusqu'à au moins un mois après la fin du traitement.

Entre 2002 et 2017, six événements liés à la santé des poissons attribués à la furonculose ont été signalés dans des fermes d'élevage de saumon atlantique en Colombie-Britannique (Tableau 7). L'industrie a fourni des données pour les cinq derniers de ces événements attribués à la furonculose (les données sur la mortalité n'étaient pas disponibles pour les événements déclarés avant 2009). La mortalité quotidienne moyenne attribuée à la furonculose au niveau de la ferme pendant les événements liés à la santé des poissons était de 0,1 % ou moins dans tous les cas sauf un, où elle était de 0,21 % sur une période de 11 jours.

3.4.2.6 Pression d'infection estimée de la bactérie *Aeromonas salmonicida* provenant des fermes d'élevage de saumon atlantique

Pour pouvoir estimer la concentration potentielle de la bactérie *A. salmonicida* dans l'eau dans une ferme pendant une épidémie de furonculose, il faut estimer le nombre de poissons contaminés pendant une épidémie, le taux d'excrétion bactérienne, la durée de l'excrétion et le volume de la ferme.

Il est difficile d'estimer précisément la prévalence de la bactérie *A. salmonicida* dans une ferme d'élevage de saumon atlantique contaminée pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les échantillons sont généralement prélevés sur un petit nombre de poissons récemment morts, selon les besoins déterminés par le jugement professionnel du vétérinaire ou de l'équipe de santé des poissons. Les poissons échantillonnés ne sont donc pas représentatifs de la population. Ensuite, l'absence de furonculose clinique ne peut être considérée comme une preuve de l'absence de la bactérie *A. salmonicida*, car des porteurs sains peuvent être présents. Enfin, bien que les poissons soient vaccinés contre la maladie, des détections occasionnelles de la bactérie *A. salmonicida* par culture indiquent que la bactérie peut encore être présente, mais probablement à de faibles concentrations.

Comme la furonculose est une maladie induite par le stress et que les événements liés à la santé des poissons attribués à la furonculose dans les fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery ont été signalés dans les trois mois suivant le transfert, nous avons utilisé le taux de mortalité quotidienne moyenne attribué à la maladie comme indicateur de la prévalence dans la population. Reconnaissant que cette approche ne tient pas compte des éventuels porteurs sains supplémentaires, nous avons adopté une approche du pire cas pour estimer la pression d'infection d'après la mortalité quotidienne moyenne la plus élevée attribuable à la maladie pendant un événement lié à la santé des poissons et les taux d'excrétion élevés fondés sur les poissons contaminés.

La pression d'infection, ou la concentration estimée dans l'eau attribuable aux fermes, a été estimée dans les parcs en filet (pression d'infection maximale) et dans les panaches dispersés.

3.4.2.6.1 Concentration dans l'eau dans les parcs en filet

Nous avons estimé la concentration dans l'eau sur 24 heures de la bactérie *A. salmonicida* à partir de la mortalité moyenne la plus élevée signalée dans les fermes d'élevage de saumon atlantique au cours d'un événement lié à la santé des poissons, du taux médian d'excrétion bactérienne relevé chez les saumons atlantiques morts et du volume des fermes; cette estimation peut être représentée comme suit :

$$[A. salmonicida] = \frac{\text{Mortalité due à la furunculose dans les fermes} \times \text{Taux d'excrétion} \times \text{Période}}{\text{Volume des parcs en filet de la ferme}}$$

Les fermes d'élevage de saumon atlantique en activité entre janvier 2013 et juin 2018 comptaient en moyenne 514 000 poissons par élevage (maximum de 781 000) [données fournies par la Division de la gestion de l'aquaculture du MPO]. Les données antérieures à janvier 2013 ne sont pas disponibles. Le volume moyen des fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery est d'environ 195 000 m³ (Mimeault *et al.*, 2017).

En fonction d'une mortalité quotidienne moyenne attribuée à la furunculose de 0,21 % (voir la section 3.4.2.4) et d'un taux d'excrétion de $5,4 \times 10^7$ ufc par poisson et par heure (voir la section 3.2.2.2), la concentration dans l'eau de la bactérie *A. salmonicida* après 24 heures d'excrétion constante a été estimée à $7,2 \times 10^6$ ufc/m³. Bien que l'excrétion par les poissons vivants contaminés contribue également à la concentration dans l'eau de la bactérie *A. salmonicida*, il n'est pas possible d'estimer cette composante étant donné que l'on ignore la prévalence au niveau de la ferme et l'excrétion par les poissons présentant une infection subclinique. Quoiqu'il en soit, l'estimation ci-dessus de $7,2 \times 10^6$ ufc/m³ est considérée comme une surestimation et le pire des scénarios, car elle ne tient pas compte de la décomposition bactérienne et de la dispersion hydrodynamique.

Boily *et al.* (2019) ont compilé des constantes du taux de décomposition pour *A. salmonicida* dans des milieux saumâtres et marins non stériles. Si l'on applique les constantes du taux de décroissance la plus lente (0,66/jour) et moyenne (2,09/jour) à une ferme d'élevage de saumon atlantique comptant un nombre moyen (514 000) ou maximal (781 000) de poissons, les concentrations pourraient théoriquement atteindre une concentration maximale de $1,7 \times 10^7$ cellules/m³ dans une grande ferme d'élevage en moins de cinq jours, sans tenir compte de la dispersion hydrodynamique (Figure 5).

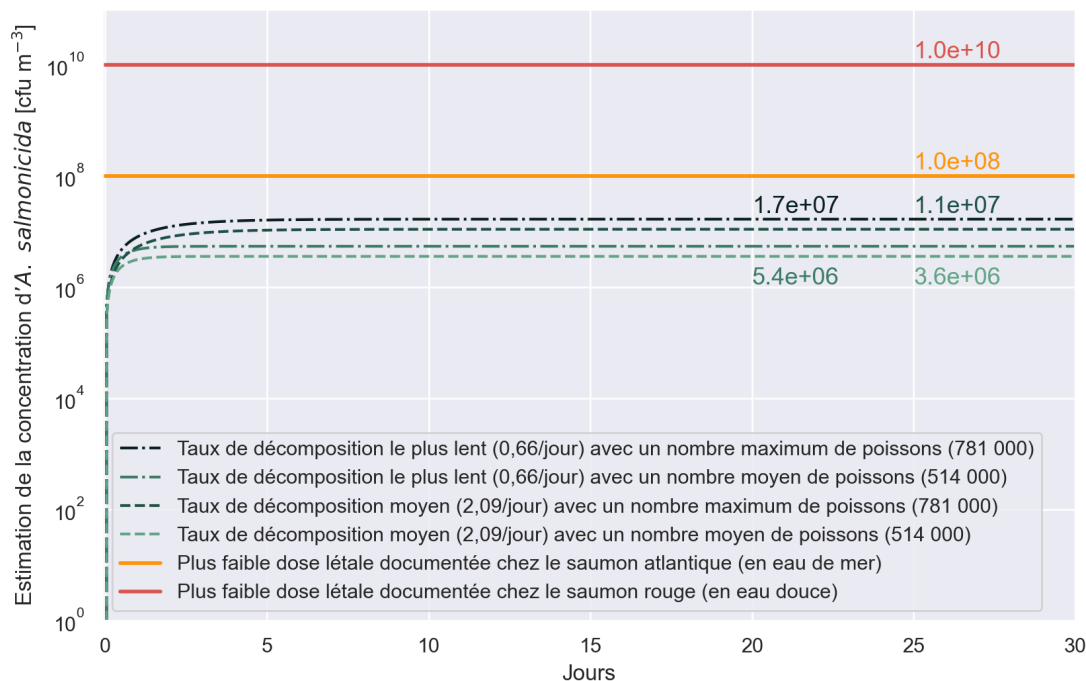


Figure 5. Estimation de la concentration maximale de la bactérie *Aeromonas salmonicida* dans l'eau (ufc/m^3) dans une ferme d'élevage de saumon atlantique contaminée de la région des îles Discovery, en Colombie-Britannique. Les lignes vertes représentent les concentrations estimées dans l'eau en supposant un nombre de 514 000 ou 781 000 poissons dans la ferme, le taux de décomposition le plus lent ou moyen de la bactérie *A. salmonicida* (0,66 ou 2,09 par jour, respectivement), un volume de $195\,000\text{ m}^3$, une excrétion constante à partir de 0,21 % des poissons sur la base de la mortalité attribuée à la furunculose chez le saumon atlantique lors des événements liés à la santé des poissons dans la région des îles Discovery, les taux médians d'excrétion signalés chez les saumons atlantiques morts ($5,4 \times 10^7$ ufc par poisson par heure), et aucune dispersion hydrodynamique. En se fondant sur les hypothèses susmentionnées, la concentration dans l'eau atteint un plateau entre $3,6 \times 10^6$ et $1,7 \times 10^7$ cellules/ m^3 . La ligne jaune représente la plus faible dose létale documentée chez le saumon atlantique dans l'eau de mer ($1,0 \times 10^8$ cellules/ m^3 pendant 12 heures par jour pendant 21 jours). La ligne rouge représente la plus faible dose létale documentée pour le saumon rouge dans l'eau douce ($1,0 \times 10^{10}$ cellules/ m^3 pendant 20 minutes).

3.4.2.6.2 Concentration dans l'eau dans les panaches

La dispersion de la bactérie *A. salmonicida* à partir des fermes marines de saumon atlantique dans la région des îles Discovery a été modélisée à l'aide de modèles de circulation et de dispersion océaniques, d'inactivation et de réinfection (Foreman *et al.* 2012; Foreman *et al.* 2015a). L'annexe D détaille les hypothèses et les paramètres d'entrée. Pour résumer, le modèle suppose que les 18 fermes ont été contaminées et ont rejeté des particules de la bactérie *A. salmonicida* simultanément. Bien que cette hypothèse ne soit pas réaliste, nous avons adopté une telle approche pour déterminer les concentrations maximales de la bactérie *A. salmonicida* dans l'eau à partir de tous les chevauchements possibles entre les panaches de dispersion provenant de plus d'une ferme.

La dispersion a été simulée pendant deux mois (mai et juin 2010) et la concentration maximale dans l'eau a été estimée en comptant le nombre de particules actives par rapport à des

volumes donnés. La Figure 6 illustre les concentrations maximales (ufc/m³) sur toute la durée de la dissémination simultanée de la bactérie *A. salmonicida* à partir de 18 fermes élevant des saumons atlantiques vaccinés contre la furunculose.

La plus forte concentration estimée, de $1,5 \times 10^6$ cfu/m³, s'est produite après 18 jours de dissémination et de dispersion continues en mai à partir de la ferme des roches Cyrus. Pour toutes les durées et tous les volumes, la concentration maximale s'est produite à quelques kilomètres de la principale ferme émettrice. Entre 5 et 10 m de profondeur, la concentration maximale provenait de plus d'une ferme, et la contribution de Brougham et de la pointe Sonora était respectivement de 56,2 % et 43,8 % de la concentration estimée.

Tableau 13. Concentrations modélisées de la bactérie Aeromonas salmonicida (ufc/m³) attribuables aux fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery. Le modèle suppose que les 18 fermes d'élevage de saumon atlantique opérant dans la région des îles Discovery rejettent simultanément des bactéries en mai et en juin, et part de l'hypothèse d'une moyenne de 514 000 poissons dans chaque ferme et d'une constante de décomposition exponentielle de la bactérie A. salmonicida de 0,66 par jour. Toutes les concentrations sont des maximums modélisés, calculés sur diverses tranches d'eau. L'heure indique le moment où la concentration maximale s'est produite. L'emplacement approximatif est l'endroit géographique où les particules bactériennes ont été observées pour produire cette concentration maximale.

Plage de profondeurs	Concentration maximale [<i>A. salmonicida</i>] (ufc/m ³)	Emplacement approximatif	Heure (UTC)	Fermes concernées et % de la contribution
0 – 5 m	$1,5 \times 10^6$	5 km au sud des roches Cyrus	18 mai, 14 h	Roches Cyrus (100 %)
5 – 10 m	$6,0 \times 10^5$	2 km au nord de Brougham	10 juin, 18 h	Brougham (56,2 %) Pointe Sonora (43,8 %)
10 – 15 m	$5,2 \times 10^5$	2,5 km au sud-est de la baie Barnes	8 mai, 6 h	Baie Barnes (100 %)
15 – 20 m	$5,0 \times 10^5$	300 m au sud de Bickley	22 mai, 16 h	Bickley (100 %)
20 – 30 m	$2,7 \times 10^5$	300 m au sud de Bickley	28 mai, 19 h	Bickley (100 %)
30 – 40 m	$2,2 \times 10^5$	300 m au sud de Bickley	12 mai, 22 h	Bickley (100 %)
40 – 50 m	$1,6 \times 10^5$	800 m à l'ouest d'Okisollo	31 mai, 10 h	Okisollo (100 %)

Les concentrations indiquées dans le Tableau 13 tiennent compte des courants dus aux marées, des vents, des rejets d'eau douce, du flux de chaleur et de la décomposition bactérienne dans l'eau. Le modèle suppose que les 18 fermes d'élevage de saumon atlantique sont simultanément contaminées et rejettent *A. salmonicida* en même temps, ce qui, bien qu'étant un scénario extrêmement irréaliste qui n'a jamais été observé, est considéré comme le pire des scénarios. La Figure 6 montre la distribution des particules modélisées à 14 h UTC le 18 mai, l'heure de la concentration maximale dans les cinq mètres supérieurs de la colonne d'eau.

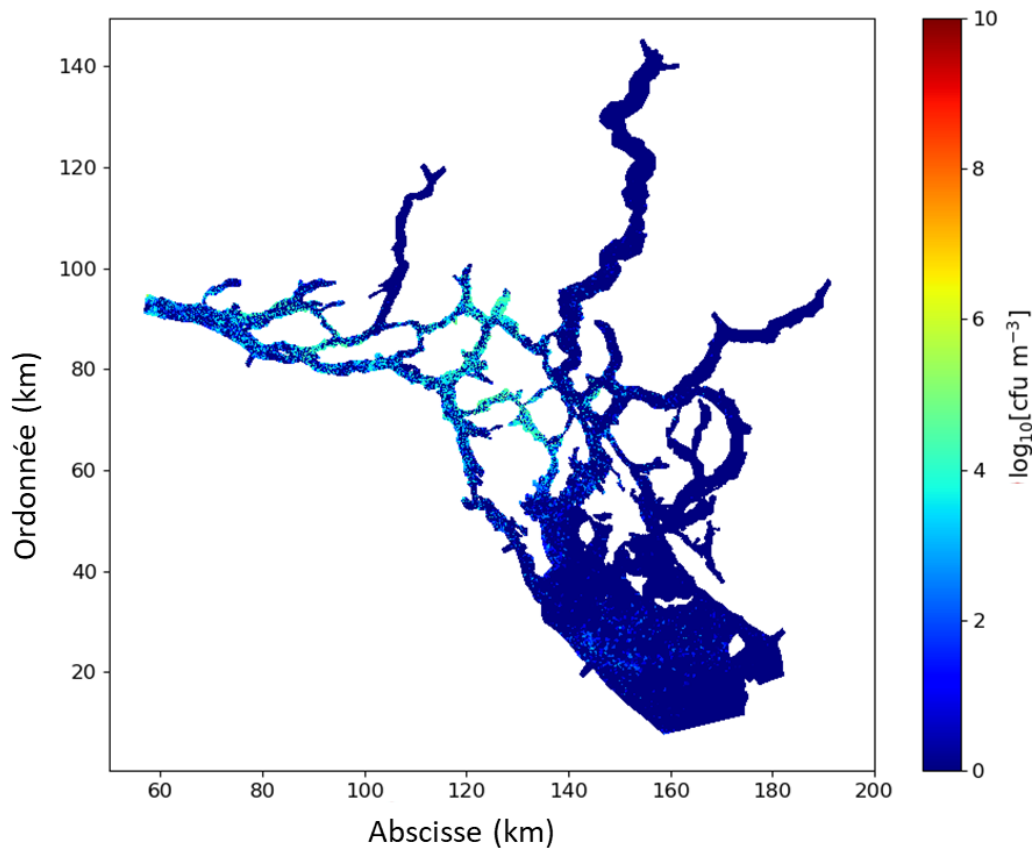


Figure 6. Distribution modélisée de la concentration de la bactérie *Aeromonas salmonicida* dans les cinq premiers mètres pendant 60 jours d'excrétion continue en mai et juin dans la région des îles Discovery. La figure illustre la distribution modélisée le 18 mai à 14 h UTC, qui correspond à l'heure de la concentration maximale.

La transmission hydrodynamique de la bactérie *A. salmonicida* dans l'eau de mer a été signalée entre les cages d'une ferme d'élevage de saumon atlantique en Irlande (Smith *et al.*, 1982), et démontrée à l'aide d'un modèle simple de suivi des particules dans un loch écossais (Rose, 1990). D'après ce modèle, on a prédit que la bactérie *A. salmonicida* se déplacerait dans l'hypothétique loch sur au moins six à neuf km en aval de la pisciculture (Rose, 1990), ce qui favoriserait ainsi la dispersion et la transmission hydrodynamiques de la bactérie *A. salmonicida* dans le milieu marin.

3.4.3 Hypothèses

- Les saumons rouges du fleuve Fraser entrant dans la zone des îles Discovery sont naïfs à *A. salmonicida*.
- Les saumons rouges du fleuve Fraser et d'autres espèces sensibles de saumons du Pacifique ont été exposés à *A. salmonicida* disséminée à partir des fermes d'élevage de saumon atlantique opérant dans la région des îles Discovery.

3.4.4 Probabilité d'infection

Le Tableau 14 présente les principaux facteurs contributifs et limitatifs de la probabilité qu'une espèce de salmonidé sensible soit contaminée par la bactérie *A. salmonicida* rejetée par les fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery. Ces facteurs ont été utilisés pour déterminer les classements de probabilité et d'incertitude selon les définitions des Tableau 2, Tableau 5 et Tableau 6.

Tableau 14. Facteurs contributifs et limitatifs de la probabilité que des saumons rouges du fleuve Fraser et d'autres espèces de saumons du Pacifique sensibles soient contaminés par la bactérie *Aeromonas salmonicida* disséminée à partir des fermes d'élevage contenant des saumons atlantiques infectés dans la région des îles Discovery, compte tenu des pratiques actuelles en matière de gestion de la santé du poisson.

Facteurs contributifs	Facteurs limitatifs
- Le saumon chinook, le saumon coho, le saumon rose, le saumon kéta et le saumon rouge sont sensibles à l'infection par <i>A. salmonicida</i> et à la furunculose. - La température et la salinité de l'eau à proximité des fermes d'élevage de saumon atlantique sont convenables à la survie de la bactérie <i>A. salmonicida</i>. - La transmission de la bactérie <i>A. salmonicida</i> dans le milieu marin a été décrite (Smith <i>et al.</i>, 1982). - Les saumons rouges juvéniles pourraient passer à proximité de fermes d'élevage de saumon atlantique pendant trois à huit jours durant leur migration dans la région des îles Discovery. - Les saumons rouges adultes pourraient se trouver à proximité des fermes d'élevage de saumon atlantique pendant deux jours durant leur migration dans la région des îles Discovery.	- La concentration maximale estimée de la bactérie <i>A. salmonicida</i> dans l'eau d'une ferme d'élevage de saumon atlantique contaminée ($1,1 \times 10^7$ ufc/m³ dans une ferme de taille moyenne) est environ le neuvième de la concentration qui a causé la mortalité après une exposition quotidienne de 12 heures pendant 21 jours (1×10^8 ufc/m³). - D'après une étude téléométrique, les saumons rouges juvéniles passent peu de temps (quelques minutes) à proximité des fermes en jachère (Rechisky <i>et al.</i>, 2018). - Tous les saumons atlantiques élevés dans la région des îles Discovery sont vaccinés contre la furunculose.

La probabilité d'infection a été examinée séparément pour les trois groupes d'exposition et la conclusion a été la même.

La conclusion a été qu'il est **très improbable** qu'au moins un saumon rouge du fleuve Fraser ou une autre espèce de saumon du Pacifique sensible soit infecté par *A. salmonicida* attribuable aux fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery à la suite d'une exposition par l'eau compte tenu des pratiques actuelles de gestion de la santé des poissons, étant donné que la concentration estimée de la bactérie *A. salmonicida* dans l'eau dans une ferme d'élevage moyenne de saumon atlantique lors d'une épidémie est d'environ un neuvième de la concentration qui n'a pas causé d'infection chez le saumon atlantique après une exposition quotidienne de 12 heures pendant sept jours (et a nécessité une exposition quotidienne de 12 heures pendant 21 jours pour causer la mortalité). En outre, la probabilité que des saumons juvéniles nagent dans les parcs en filet et entrent en contact avec des

poissons contaminés est reconnue, mais ne peut être quantifiée. Cette conclusion est assortie d'une **incertitude raisonnable** compte tenu des données incomplètes et de la dépendance à l'égard des données de substitution.

3.5 ÉVALUATION DE LA PROBABILITÉ GLOBALE

Les probabilités estimées ont été combinées selon les règles de combinaison décrites dans la section sur la méthodologie. La probabilité combinée pour l'évaluation de la dissémination a été déterminée en adoptant la probabilité la plus élevée parmi les voies de dissémination. La probabilité combinée pour chaque groupe d'exposition a été déterminée en adoptant le plus faible classement parmi les évaluations d'infection à la ferme, de dissémination, d'exposition et d'infection. Les incertitudes n'ont pas été combinées.

Le Tableau 15 résume l'évaluation de la probabilité. La conclusion a été qu'il est **très improbable**, pour tous les groupes d'exposition, qu'un poisson sauvage sensible soit contaminé par la bactérie *A. salmonicida* disséminée à partir des fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery.

Tableau 15. Sommaire des classement de probabilité et d'incertitude pour l'évaluation de la probabilité dans le cadre de l'évaluation du risque que pose *Aeromonas salmonicida*. Les résultats sont indiqués dans les cellules blanches et les résultats combinés concernant la probabilité sont présentés dans les cellules ombrées de la colonne « Classement ».

Étape		Classement		
Évaluation de l'infection à la ferme	Probabilité d'infection à une ferme	Improbable (certitude raisonnable)		
Évaluation de la dissémination	Voies de dissémination	Saumon atlantique d'élevage		Vecteurs mécaniques et vecteurs passifs
	Probabilité de dissémination	Extrêmement probable (certitude élevée)		Improbable (certitude raisonnable)
	Probabilités combinées de dissémination	Extrêmement probable		
Évaluations de l'exposition et de l'infection	Groupes d'exposition	Saumon rouge juvénile du fleuve Fraser	Saumon rouge adulte du fleuve Fraser	Autres espèces sensibles de saumons du Pacifique
	Probabilité d'exposition	Probable (certitude raisonnable)	Probable (certitude raisonnable)	Extrêmement probable (incertitude raisonnable)
	Probabilité d'infection	Très improbable (incertitude raisonnable)	Très improbable (incertitude raisonnable)	Très improbable (incertitude raisonnable)
Probabilités combinées d'exposition et d'infection pour chaque groupe d'exposition		Très improbable	Très improbable	Très improbable
Probabilités combinées (infection à la ferme, dissémination, exposition et infection) pour chaque groupe d'exposition		Très improbable	Très improbable	Très improbable

4 ÉVALUATION DES CONSÉQUENCES

L'évaluation des conséquences cherche à déterminer l'ampleur potentielle des effets de l'infection par *A. salmonicida* provenant des fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery sur l'abondance et la diversité du saumon rouge du fleuve Fraser.

L'évaluation de l'infection à la ferme a permis de déterminer qu'il est improbable que des saumons atlantiques contaminés par *A. salmonicida* soient présents dans au moins une ferme de la région des îles Discovery. Les années où il n'y a pas eu d'infection par *A. salmonicida* dans les fermes, aucune conséquence sur l'abondance et la diversité du saumon rouge du fleuve Fraser ne serait attribuable à la bactérie dans les fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery. Les années où l'infection par *A. salmonicida* a été attestée dans les fermes, l'évaluation de l'exposition a permis de déterminer que les poissons contaminés étaient présents dans une ferme au maximum au cours d'un mois donné (voir le Tableau 11). L'évaluation de la probabilité globale a conclu qu'il est très improbable que des saumons rouges du fleuve Fraser soient contaminés par la bactérie *A. salmonicida* attribuable aux fermes

d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery, selon les pratiques de gestion actuelles.

Nonobstant cette conclusion et en supposant qu'au moins un poisson sauvage sensible aura été contaminé par *A. salmonicida* provenant de ces fermes, l'évaluation des conséquences explore l'ampleur potentielle des effets sur le nombre d'adultes en montaison et la diversité du saumon rouge du fleuve Fraser.

4.1 QUESTION

En supposant qu'au moins un poisson sauvage sensible a été contaminé par la bactérie *A. salmonicida* disséminée à partir de saumons atlantiques contaminés, quelle est l'ampleur potentielle des effets sur le nombre d'adultes en montaison et la diversité du saumon rouge du fleuve Fraser?

4.2 CONSIDÉRATIONS

Les éléments à prendre en considération sont la dynamique de l'infection, les effets sublétaux de l'infection, les estimations de la densité du saumon rouge du fleuve Fraser, la proportion de ces poissons qui est potentiellement exposée aux fermes contaminées et l'exposition sur deux générations.

4.2.1 Dynamique de l'infection à *Aeromonas salmonicida*

Des épidémies se produisent lorsque les conditions sont défavorables à l'hôte (stress environnemental et physiologique) et propices à l'agent pathogène (hôte immunodéprimé, survie de l'agent pathogène dans l'environnement). Un nombre minimum de poissons contaminés et malades ayant un contact suffisant avec des hôtes sensibles est nécessaire pour qu'une infection s'établisse et se propage dans une population.

La transmission horizontale est le principal mode de transmission (Roberts, 2012). La période entre l'exposition et la première mortalité observée dans les études en immersion varie entre un et deux jours chez le saumon chinook (poissons de moins de 20 g exposés pendant 15 minutes en eau douce à $4,8 \times 10^3$ cellules/mL de la bactérie *A. salmonicida*) [voir Beacham et Evelyn (1992)] et 24 jours chez le saumon atlantique (poissons de 75 à 115 g exposés 12 h par jour pendant 21 jours en eau de mer à 10^2 ufc/mL de la bactérie *A. salmonicida*) [voir Rose *et al.* (1989)].

La densité de la population hôte est un facteur important dans la dynamique des épizooties de furunculose, les mortalités propres à la maladie diminuant avec la réduction de la densité de l'hôte dans des conditions de laboratoire en eau douce pour le saumon chinook (1,7 g) [voir Ogut et Reno (2004) et Ogut *et al.* (2005)]. Plus précisément :

- Les mortalités propres à l'infection et à la furunculose ont été observées à des densités allant de 9,13 à 0,36 poisson/L (ce qui équivaut à 9 130 à 360 poissons/m³).
- La transmission de l'infection sans épizootie dans la population a été observée pendant la durée de l'expérience (23 à 33 jours) à des densités comprises entre 0,19 et 0,06 poisson/L (équivalent à 190 à 60 poissons/m³).
- Aucune transmission de l'infection n'a été observée sur une période de 33 jours à 0,03 poisson/L (équivalent à 30 poissons/m³).

Bien que les valeurs de densité ci-dessus soient propres aux conditions expérimentales, elles viennent étayer l'idée qu'une densité critique de la population hôte est nécessaire pour une transmission efficace de la bactérie *A. salmonicida* et la progression de la maladie.

4.2.2 Effets sublétaux de l'infection par *Aeromonas salmonicida*

Il est reconnu que l'exposition aux agents pathogènes peut avoir des effets à la fois sublétaux et cumulatifs. Les effets sublétaux documentés dus à la furunculose sont rares et aucun n'est décrit dans les populations de poissons sauvages. Aucune publication n'a été trouvée sur les effets de la furunculose chronique (Boily *et al.*, 2019).

D'après des études en laboratoire menées sur d'autres espèces de salmonidés, l'infection pourrait avoir des effets physiologiques (Ellis *et al.*, 2007; Yi *et al.*, 2016); cependant, on ignore si une exposition sublétales à *A. salmonicida* entraînerait une résistance accrue ou réduite à une nouvelle infection par *A. salmonicida* ou d'autres agents pathogènes. Il n'existe pas de données indiquant quels seraient les effets physiologiques de l'infection sur le saumon rouge du fleuve Fraser ou les effets qui en résulteraient au niveau de la population de saumon rouge du fleuve Fraser.

4.2.3 Estimation de la densité du saumon rouge du fleuve Fraser

Après une infection par un agent pathogène, la propagation dans une population dépend, entre autres paramètres, de la densité de la population. Comme la présente évaluation du risque concerne la propagation potentielle d'une infection acquise à partir de fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery, il n'est pas pertinent d'estimer la densité des juvéniles dans les rivières. Les densités dans la région des îles Discovery et en haute mer sont les plus pertinentes pour la présente évaluation.

4.2.3.1 Durant la dévalaison des juvéniles

Nous avons estimé les densités approximatives des saumons rouges juvéniles dans le détroit de Georgia à partir des données recueillies à la senne coulissante en mai et juin entre 2010 et 2012 (Neville *et al.*, 2013; Freshwater *et al.*, 2017). Ces études reposaient sur l'utilisation d'une senne coulissante longue de 280 m et profonde de 9 m (soit un volume cylindrique d'environ 56 000 m³). Les CPUE moyennes les plus élevées déclarées des saumons rouges du fleuve Fraser s'établissaient à 1 534 et ont été enregistrées dans la région des îles Discovery en juin 2012 (Neville *et al.*, 2013). Les CPUE moyennes enregistrées dans le détroit de Georgia en mai et en juin étaient inférieures d'au moins un ordre de grandeur (Neville *et al.*, 2013). En utilisant le même ensemble de données, Freshwater *et al.* (2017) ont indiqué des CPUE combinées pour les mois de mai et de juin de 49 ± 239 et 323 ± 780 (moyenne $\pm$ ET) pour 2011 et 2012, respectivement.

D'après les CPUE moyennes les plus élevées (1 534) et en présumant que le volume d'eau échantillonné pour chaque ensemble était de 56 000 m³, la densité moyenne estimée la plus élevée des saumons rouges juvéniles dans ce secteur devrait se situer à environ 0,03 poisson/m³. Il convient de noter que ces estimations reposent sur l'hypothèse que les poissons sont uniformément répartis dans la zone échantillonnée par le filet, et que tous les poissons présents dans la zone échantillonnée sont capturés (c.-à-d. qu'il n'y a pas de comportement d'évitement du filet ou de poissons qui s'en échappent). Ces estimations devront être révisées au fur et à mesure que les résultats des études en cours seront disponibles.

4.2.3.2 En haute mer

Il n'existe pas de données sur l'abondance ou la densité des saumons rouges en haute mer; c'est pourquoi, dans la présente évaluation du risque, nous avons utilisé des données de substitution.

À l'aide de méthodes hydroacoustiques, Nero et Huster (1996) ont estimé la densité moyenne des saumons (spp.) à 114 saumons/km² dans le golfe d'Alaska (ce qui, selon eux, est comparable aux estimations historiques de 160 saumons/km²). Comme les saumons se trouvaient au maximum à 40 m sous la surface de la mer pendant la journée (Nero et Huster, 1996), leur densité moyenne est donc estimée à environ $2,9 \times 10^{-6}$ poissons/m³. Si l'on présume que les saumons demeurent principalement dans les dix premiers mètres de la colonne d'eau, c'est là que devrait se trouver la plus grande concentration [Ware et McFarlane (1989); Groot et Margolis (1991) cités dans Nero et Huster (1996)] et leur densité devrait être d'environ $1,1 \times 10^5$ poisson/m³. Il convient de noter que Nero et Huster (1996) n'ont précisé ni les espèces de saumons, ni les tailles des poissons.

Comme la disposition spatiale des saumons donne à penser qu'à de petites échelles spatiales (2 - 200 m), les saumons sont uniformément répartis, tandis qu'à des échelles spatiales plus élevées (400 - 2 000 m), ils se regroupent (Nero et Huster, 1996), la densité aux petites échelles pourrait être supérieure aux estimations moyennes susmentionnées. Cependant, bien que les données soient limitées, il est raisonnable de prévoir que la densité du saumon rouge du fleuve Fraser devrait être moins importante en mer que durant la migration dans les chenaux de la région des îles Discovery.

4.2.4 Estimation de la proportion potentiellement exposée à des fermes contaminées

Cette section explore la proportion de la population de saumon rouge du fleuve Fraser qui se trouve dans la région des îles Discovery pendant la même période que celle où les infections à *A. salmonicida* ou la furunculose ont été signalées dans des fermes d'élevage de saumon atlantique.

Comme il existe des voies de migration dans la région des îles Discovery où il n'y a pas de ferme d'élevage de saumon atlantique, et que l'emplacement et le nombre des fermes contaminées simultanément seront des aspects critiques pour évaluer l'exposition réelle aux fermes contaminées, l'analyse suivante fournit une surestimation de la proportion de la population exposée à des fermes contaminées dans la zone des îles Discovery pendant les périodes où des infections à *A. salmonicida* ou la furunculose ont été détectées dans une ou plusieurs fermes.

Il s'agit de la première étape pour déterminer la proportion de la population qui pourrait être exposée à *A. salmonicida* attribuable à une ferme d'élevage de saumon atlantique contaminée dans la région des îles Discovery, sachant que le chevauchement simultané n'entraîne pas nécessairement une exposition et que l'exposition n'entraîne pas nécessairement une infection. Ces estimations sont fondées sur la période de la migration du saumon rouge du fleuve Fraser et sur les preuves d'infection dans les fermes de la région.

4.2.4.1 Juvéniles

Des millions de saumons rouges juvéniles du fleuve Fraser traversent chaque année la région des îles Discovery pendant leur migration [examen dans Grant *et al.* (2018)]. Les connaissances sur les voies de dévalaison en mer empruntées par les juvéniles dans la région des îles Discovery et les interactions de ceux-ci avec les fermes d'élevage de saumon atlantique sont limitées. Par conséquent, il n'est pas possible d'estimer, à partir des voies de migration, la proportion de la population qui pourrait nager à proximité d'une ferme d'élevage de saumon atlantique contaminé. On a donc supposé que tous les saumons rouges juvéniles du fleuve Fraser en dévalaison pourraient être exposés à *A. salmonicida* provenant des fermes contaminées pendant leur migration dans la région des îles Discovery. Cette hypothèse devra

être revue à mesure que nous connaissons mieux les voies migratoires du saumon rouge du fleuve Fraser.

Toutefois, comme il n'y a pas des fermes d'élevage de saumon atlantique dans tous les chenaux et qu'elles n'occupent pas un grand volume de la région des îles Discovery (voir la Figure 1 et la section 3.3.2.2), il est raisonnable de présumer que tous les poissons ne se trouveront pas dans les environs d'une ferme contaminée ou ne seront pas exposés aux agents pathogènes dispersés à partir de ces fermes. En outre, ces estimations doivent tenir compte de la présence du saumon rouge du fleuve Fraser dans la région par rapport au moment de ces infections. Les saumons rouges juvéniles du fleuve Fraser du type lacustre traversent la région des îles Discovery chaque année de la mi-mai à la mi-juillet durant leur dévalaison (Grant *et al.*, 2018). La dévalaison n'est toutefois pas répartie uniformément sur les trois mois (Neville *et al.*, 2016; Freshwater *et al.*, 2019). D'après les données sur les prises de Freshwater *et al.* (2019), 30 %, 62 % et 8 % des juvéniles ont été capturés en mai, juin et juillet, respectivement.

Compte tenu de la distribution temporelle du saumon rouge du fleuve Fraser dans la région des îles Discovery et en considérant uniquement les années avec infection, de 30 à 62 % (médiane = 62 % et moyenne = 51 %) des juvéniles auraient eu la possibilité d'être exposés à *A. salmonicida* attribuable aux fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery durant leur dévalaison (annexe E). Ces estimations supposent également que les poissons migrateurs rencontreront une ou des fermes contaminées, c'est-à-dire que les poissons emprunteront les voies sur lesquelles celles-ci se trouvent.

4.2.4.2 Adultes

Le saumon rouge remonte dans le fleuve Fraser soit par la route nord (détroit de Johnstone), soit par la route sud (détroit de Juan de Fuca) [examen dans Grant *et al.* (2018)]. Les taux de détournement vers le nord sont très variables, allant de 10 % à 96 % par an entre 1980 et 2017 (Pacific Salmon Commission, 2017; Grant *et al.*, 2018; Pacific Salmon Commission, 2018). En supposant que tous les saumons rouges en montaison qui empruntent la voie du nord traversent la région des îles Discovery, entre 10 et 96 % des adultes du fleuve Fraser en montaison pourraient être exposés à une ferme d'élevage de saumon atlantique pendant leur migration.

Les saumons rouges du fleuve Fraser en montaison traversent la région des îles Discovery entre la fin du mois de juin et le début du mois d'octobre [examen dans Grant *et al.* (2018)]. La montaison n'est toutefois pas répartie uniformément sur les cinq mois. D'après les données sur les captures en aval de Mission fournies par la Commission du saumon du Pacifique (voir l'annexe E), 0,3 %, 12,2 %, 79,7 %, 7,7 % et 0,1 % des adultes en montaison devraient être présents dans la région des îles Discovery en juin, juillet, août, septembre et octobre, respectivement.

Compte tenu de la distribution temporelle et du détournement vers le nord des adultes en montaison et en considérant uniquement les années avec infection, de 0,2 à 62,1 % (médiane = 0,3 % et moyenne = 20,9 %) des adultes auraient eu la possibilité d'être exposés à *A. salmonicida* attribuable aux fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery durant leur montaison (annexe E). Ces estimations supposent également que les poissons migrateurs rencontreront une ou des fermes contaminées, c'est-à-dire que les poissons emprunteront les voies sur lesquelles celles-ci se trouvent.

4.2.5 Estimations de l'exposition sur deux générations

Nous avons estimé l'exposition potentielle des populations de saumon rouge du fleuve Fraser à des fermes d'élevage de saumon atlantique contaminées par *A. salmonicida* sur deux

générations (huit ans pour le saumon rouge du fleuve Fraser) pour explorer les possibles effets sur la diversité.

Étant donné les deux résultats possibles de l'exposition au cours d'une année donnée pour le saumon rouge du fleuve Fraser en migration, c'est-à-dire que le saumon en migration peut être exposé compte tenu des preuves d'infection dans les fermes de la région (résultat de réussite) ou que le saumon en migration ne peut pas être exposé compte tenu du manque de preuves d'infection dans les fermes de la région (résultat d'échec), le nombre de réussites (s) sur un nombre donné d'essais (n) peut être estimé à l'aide du processus binomial (annexe F).

En moyenne, sur deux générations, les saumons rouges du fleuve Fraser (juvéniles et adultes) peuvent rencontrer des fermes d'élevage de saumon atlantique contaminées par *A. salmonicida* dans la région des îles Discovery au cours de deux des huit années. Cela suppose que lorsqu'une ferme est contaminée, le saumon rouge choisit les voies qui passent par les fermes contaminées. La probabilité qu'une exposition, mais pas nécessairement une infection, se produise pendant au moins quatre années consécutives sur deux générations (huit ans) est de 0,33 % pour les saumons rouges juvéniles et adultes du fleuve Fraser (voir l'annexe F).

Malgré l'exposition potentielle sur deux générations, l'évaluation de la probabilité a conclu qu'il était très improbable que le saumon rouge du fleuve Fraser soit contaminé par *A. salmonicida* attribuable aux fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery, compte tenu des pratiques de gestion actuelles.

4.3 HYPOTHÈSES

- Il n'y a pas de corrélation entre la mortalité due à la furunculose et la mortalité marine due à d'autres sources chez le saumon rouge, c'est-à-dire que le taux de mortalité marine est le même chez les poissons contaminés et non contaminés.
- Lorsqu'une ferme est contaminée, le saumon rouge utilise les voies qui passent par les fermes infectées.

4.4 AMPLEUR DES CONSÉQUENCES

La Figure 7 illustre les résultats potentiels de la propagation et de l'établissement résultant d'au moins un saumon rouge du fleuve Fraser contaminé par la bactérie *A. salmonicida* disséminée par des saumons atlantiques contaminés d'une ferme de la région des îles Discovery.

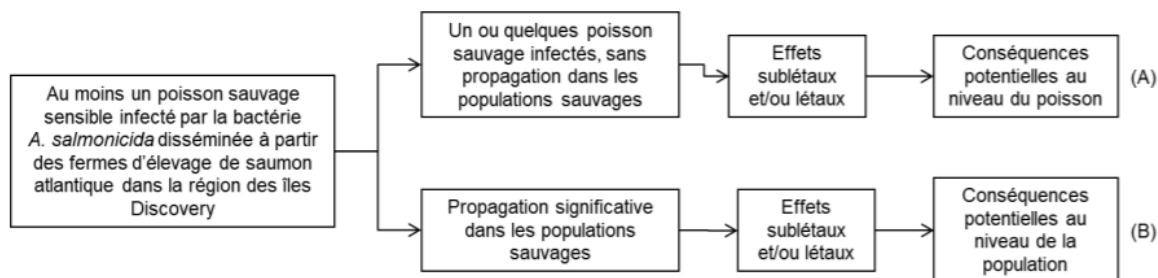


Figure 7. Résultats potentiels de l'infection d'au moins un poisson sauvage sensible par la bactérie *Aeromonas salmonicida* disséminée à partir des fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery.

L'information qui précède a permis de conclure qu'aucun ou tout au plus très peu de saumons rouges du fleuve Fraser seront contaminés, ce qui aura des conséquences négligeables au niveau de la population. Si un ou quelques poissons sont contaminés, sans propagation dans la

population, des effets sublétaux ou létaux pourraient avoir des conséquences au niveau du poisson (résultat A).

L'ampleur potentielle des conséquences sur l'abondance et la diversité du saumon rouge du fleuve Fraser résultant de l'exposition à une ferme d'élevage de saumon atlantique infectée par *A. salmonicida* a été évaluée séparément pour les saumons rouges juvéniles du fleuve Fraser, les saumons rouges adultes du fleuve Fraser et les autres espèces sensibles. Les classements ont été déterminés en fonction des définitions des conséquences sur l'abondance (Tableau 3), des conséquences sur la diversité (Tableau 4) et de l'incertitude (Tableau 5).

4.4.1 Saumon rouge juvénile du fleuve Fraser

Les saumons rouges juvéniles du fleuve Fraser devraient se trouver dans les environs des fermes d'élevage de saumon atlantique infectées par *A. salmonicida* situées dans la région des îles Discovery au cours de leur dévalaison dans l'une des huit années; la probabilité qu'une telle exposition se produise pendant quatre années consécutives est presque nulle (section 4.2.5). Les années avec infection, si l'on se fonde sur les données recueillies entre 2002 et 2017 (Tableau 11), des juvéniles pourraient avoir été exposés à une ferme contaminée par *A. salmonicida* durant leur migration dans la région des îles Discovery.

Après avoir été exposés à une ferme d'élevage de saumon atlantique contaminée par *A. salmonicida* située dans la région des îles Discovery, les saumons rouges juvéniles du fleuve Fraser continuent leur migration par le détroit de Johnstone, le détroit de la Reine-Charlotte et en haute mer. La possibilité qu'une infection acquise dans la région des îles Discovery se propage à d'autres saumons rouges juvéniles du fleuve Fraser pendant la migration en mer est prise en compte (Figure 7, résultat A).

La période de migration estimée entre la région des îles Discovery jusqu'au détroit de la Reine-Charlotte est d'environ 5 à 15 jours, d'après la vitesse de nage des juvéniles (10 à 30 km/jour), telle que résumée dans Grant *et al.* (2018). D'après des études en laboratoire, le temps entre l'exposition à *A. salmonicida* dans l'eau et la mortalité peut atteindre 24 jours chez le saumon atlantique dans l'eau de mer (Rose *et al.*, 1989). En outre, les infections latentes *A. salmonicida* peuvent se transformer en maladie à la suite d'événements de stress; il est donc probable qu'un saumon rouge juvénile du fleuve Fraser exposé ne présenterait que des signes d'infection à *A. salmonicida* attribuée à une ferme après la migration par les détroits de Johnstone et de la Reine Charlotte ou en pleine mer.

La propagation de l'infection dans la population, de même que le taux et l'ampleur de la propagation, dépendent de la probabilité qu'un individu sensible réussisse à entrer en contact (menant à la transmission de l'infection) avec un individu infectieux de la même population. Cette probabilité dépend, entre autres paramètres, de la densité de la population (Reno, 1998). Les données sur la densité de la population pendant les épizooties de furunculose sont limitées à : (1) des études en laboratoire en eau douce avec des saumons chinooks de 1,7 g [voir Ogut et Reno (2004) et Ogut *et al.* (2005)]; et (2) des événements liés à la santé des poissons attribués à la furunculose dans des fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery.

La densité à laquelle aucune transmission détectable de la bactérie *A. salmonicida* n'a été observée entre les alevins de saumon chinook en eau douce dans des conditions expérimentales (30 poissons/m³) est supérieure de trois ordres de grandeur à la densité moyenne estimée la plus élevée des saumons rouges juvéniles du fleuve Fraser (0,03 poisson/m³) dans la région des îles Discovery. À titre de comparaison, la densité moyenne des saumons atlantiques vaccinés (91 ± 19 g) pendant un événement lié à la santé des

poissons attribué à une furonculose typique dans la région des îles Discovery est de $3,02 \pm 1,82$ poissons/m³.

Bien que ce résultat repose sur des données de substitution, il permet de penser qu'il est peu probable que la densité critique de la population hôte requise pour la transmission efficace de la bactérie *A. salmonicida* et la progression de la maladie soit atteinte pour les saumons rouges du fleuve Fraser juvéniles.

En conséquence, nous avons conclu qu'il n'est pas plausible que des saumons rouges juvéniles du fleuve Fraser exposés aux concentrations estimées de la bactérie *A. salmonicida* disséminée à partir d'une ferme par des saumons atlantiques contaminés provoquent une infection qui se propagerait et s'établirait dans la population. Cette conclusion repose principalement sur la biologie de la bactérie *A. salmonicida*. Nous avons donc conclu que l'ampleur potentielle des conséquences sur l'abondance ou la diversité du saumon rouge du fleuve Fraser serait négligeable. Cette conclusion s'assortit d'une **incertitude raisonnable** étant donné la forte dépendance aux données de substitution.

4.4.2 Saumon rouge adulte du fleuve Fraser

Lorsqu'ils traversent les îles Discovery pendant leur montaison, les saumons rouges adultes du fleuve Fraser pourraient être exposés à une ferme contenant des saumons atlantiques contaminés; la probabilité d'une exposition pendant quatre années consécutives est presque nulle (section 4.2.5). Nous avons pris en considération la possibilité qu'une infection acquise dans la région des îles Discovery se propage à d'autres saumons rouges adultes du fleuve Fraser durant leur migration en eau douce ou dans les frayères (avant la réussite du frai).

Grant *et al.* (2018) ont estimé que les saumons rouges du fleuve Fraser en montaison peuvent franchir la distance entre la limite sud-est de la région des îles Discovery et Mission en trois à quatre jours environ. La distance entre les frayères du saumon rouge du fleuve Fraser et l'océan varie considérablement, allant de 40 km pour la population de Widgeon Slough à 1 200 km pour la population de la Stuart à montaison précoce (Cohen, 2012b). Dans une étude sur la santé du poisson, il a fallu environ un mois aux saumons rouges de la Stuart à montaison précoce pour atteindre les frayères (Stoddard, 1993). Étant donné que dans des études en laboratoire, le temps entre l'exposition et la mortalité chez les petits salmonidés peut atteindre 24 jours (consigné par Rose *et al.* (1989) chez des saumons atlantiques de 75 à 115 g dans l'eau de mer) et que le temps de migration du saumon rouge de la Stuart à montaison précoce (utilisé comme point de référence) peut aller jusqu'à 30 jours, certains saumons rouges adultes pourraient atteindre les frayères en présentant des signes cliniques de maladie.

Comme la densité critique des saumons rouges adultes nécessaire à une transmission efficace de la bactérie *A. salmonicida* aux poissons sensibles et à la progression de la maladie dans le milieu marin et dans les frayères n'est pas disponible, nous avons construit un modèle stochastique, fréquence-dépendant et compartimenté SEIR (susceptible-exposé-infectieux-guéri), avec mortalité due à la maladie (Keeling et Rohani, 2007) afin d'explorer les conditions dans lesquelles l'agent pathogène pourrait se propager dans la population. Étant donné que les paramètres du modèle sont inconnus pour le saumon rouge sauvage, nous avons comparé différentes combinaisons des paramètres du modèle (fondées sur des données de substitution et des hypothèses) [voir les détails à l'annexe G].

Les paramètres du modèle SEIR étaient basés sur des expériences en laboratoire menées avec des alevins de saumon chinook exposés à *A. salmonicida* par cohabitation en eau douce (Ogut *et al.*, 2004; Ogut *et al.*, 2005; Ogut et Reno, 2005). Dans des conditions incluant un taux de reproduction de base (R_0) de 3,25 [basé sur des saumons chinooks de 1,97 g dans Ogut *et al.* (2004)], la mortalité due à la maladie commencerait à augmenter lentement environ 70 jours

après l'exposition pour toucher 1 % de la population vers le 120^e jour; dans 32 % des itérations, aucune propagation significative ne s'est produite. On peut en déduire qu'une propagation importante de l'infection acquise dans la région des îles Discovery n'est pas un résultat plausible pour les saumons rouges adultes du fleuve Fraser, puisqu'ils devraient mourir de causes naturelles avant tout autre résultat.

Reconnaissant que les paramètres initiaux ne reflètent pas nécessairement l'environnement ou l'espèce de poisson, nous avons exécuté à nouveau le modèle SEIR pour examiner les conditions dans lesquelles une proportion importante de la population de saumon rouge adulte du fleuve Fraser serait infectée et mourrait de la furonculose. D'après les résultats de la modélisation, il faudrait un R_0 supérieur ou égal à 12 pour obtenir un taux de mortalité de 1 % dans les 35 jours suivant l'exposition dans les mêmes conditions. Même en modifiant d'autres paramètres jusqu'à des valeurs parfois irréalistes, il n'a pas été possible d'atteindre une mortalité cumulée de 1 % dans les 35 jours avec des valeurs de R_0 inférieures ou égales à 7 (voir plus de détails à l'annexe G). Les maladies avec un R_0 de cinq ou plus sont considérées comme très contagieuses et dans les populations bien mélangées, presque tous les individus contracteront probablement la maladie. Il est extrêmement peu probable que le taux de reproduction de base de la bactérie *A. salmonicida* soit aussi élevé chez le saumon sauvage. Toujours en utilisant les paramètres ci-dessus, nous avons aussi étudié le nombre de poissons initialement contaminés qui serait nécessaire pour qu'une proportion significative de la population meure dans les 35 jours suivant l'exposition. À $R_0 = 3,25$, il faudrait 1 000 poissons initialement contaminés; à $R_0 = 5$, il faudrait 400 poissons initialement contaminés; et à $R_0 = 8$, il faudrait environ 50 poissons initialement contaminés. Toutefois, compte tenu des conclusions de l'évaluation de l'infection et de la discussion sur le taux de reproduction de base ci-dessus, il est extrêmement peu probable que ces conditions soient présentes chez le saumon rouge adulte.

Sur la base de cet exercice de modélisation, il ne devrait pas y avoir de propagation significative de l'infection dans la population de saumon rouge adulte en montaison avant le frai. Nous avons donc conclu que l'ampleur potentielle des conséquences sur l'abondance ou la diversité du saumon rouge du fleuve Fraser serait **négligeable**. Cette conclusion s'assortit d'une **incertitude raisonnable** compte tenu de la dépendance à l'égard des données de substitution et de la modélisation.

4.4.3 Autres espèces sensibles de saumons du Pacifique

Nous avons conclu que chez les autres espèces sensibles, l'ampleur potentielle des conséquences indirectes sur l'abondance et la diversité du saumon rouge du fleuve Fraser résultant d'une infection par *A. salmonicida* attribuable aux fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery, selon les pratiques actuelles de gestion de la santé des poissons, serait **négligeable**; l'ampleur directe des conséquences sur le saumon rouge du fleuve Fraser a été jugée négligeable et rien ne permet de penser que les conséquences indirectes seraient plus importantes que les conséquences directes. Cette conclusion s'assortit d'une **incertitude raisonnable** étant donné le manque de données sur l'impact que les changements induits par *A. salmonicida* chez les autres espèces de saumons du Pacifique sensibles pourraient avoir sur l'abondance et la diversité du saumon rouge du fleuve Fraser.

5 ESTIMATION DU RISQUE

5.1 ABONDANCE

Le risque posé pour l'abondance du saumon rouge du fleuve Fraser par les infections à la bactérie *A. salmonicida* attribuable aux fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery (Tableau 16) a été estimé selon la matrice combinant les résultats de l'évaluation de la probabilité et ceux de l'évaluation des conséquences pour l'abondance (Figure 3).

Tableau 16. Estimation du risque pour l'abondance du saumon rouge du fleuve Fraser résultant de la présence de la bactérie *Aeromonas salmonicida* provenant des fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery, selon les pratiques actuelles de gestion des fermes.

Groupe d'exposition	Évaluation de la probabilité	Évaluation des conséquences	Risque pour l'abondance du saumon rouge du fleuve Fraser
Saumon rouge juvénile du fleuve Fraser	Très improbable	Négligeables	Minime
Saumon rouge adulte du fleuve Fraser	Très improbable	Négligeables	Minime

Le risque pour l'abondance du saumon rouge du fleuve Fraser résultant des conséquences écologiques potentielles de l'infection par *A. salmonicida*, chez d'autres espèces de saumons du Pacifique sensibles, attribuable aux fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery a également été examiné et s'est avéré minime.

La conclusion a été que selon les pratiques de gestion de la santé du poisson actuelles, le risque pour l'abondance du saumon rouge du fleuve Fraser à la suite d'une infection par la bactérie *A. salmonicida* attribuable aux fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery est **minime**.

5.2 DIVERSITÉ

Le risque posé pour la diversité du saumon rouge du fleuve Fraser par les infections à la bactérie *A. salmonicida* attribuable aux fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery (Tableau 17) a été estimé selon la matrice combinant les résultats de l'évaluation de la probabilité et ceux de l'évaluation des conséquences pour la diversité (Figure 4).

Tableau 17. Estimation du risque pour la diversité du saumon rouge du fleuve Fraser résultant de la présence de la bactérie *Aeromonas salmonicida* provenant des fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery, selon les pratiques actuelles de gestion des fermes.

Groupe d'exposition	Évaluation de la probabilité	Évaluation des conséquences	Risque pour la diversité du saumon rouge du fleuve Fraser
Saumon rouge juvénile du fleuve Fraser	Très improbable	Négligeables	Minime
Saumon rouge adulte du fleuve Fraser	Très improbable	Négligeables	Minime

Le risque pour la diversité du saumon rouge du fleuve Fraser résultant des conséquences écologiques potentielles de l'infection par *A. salmonicida*, chez d'autres espèces de saumons du Pacifique sensibles, attribuable aux fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery a également été examiné et s'est avéré minime.

La conclusion a été que selon les pratiques de gestion de la santé du poisson actuelles, le risque pour la diversité du saumon rouge du fleuve Fraser à la suite d'une infection par la bactérie *A. salmonicida* attribuable aux fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery est **minime**.

6 SOURCES D'INCERTITUDE

Des incertitudes entourent les évaluations de la probabilité et des conséquences. L'incertitude totale comprend à la fois la variabilité, qui est une fonction du système non réductible par d'autres mesures, et le manque de connaissances qui peut être réduit par l'obtention de données supplémentaires ou d'avis d'experts (Vose, 2008).

6.1 ÉVALUATION DE LA PROBABILITÉ

Les principales incertitudes liées à l'évaluation de la probabilité sont attribuables aux facteurs suivants :

- Le manque de données permettant d'estimer la prévalence de la bactérie *A. salmonicida* dans la population de saumon atlantique d'élevage dans des parcs en filet marins.
- La dépendance à l'égard d'une seule étude en laboratoire pour estimer les taux d'excrétion chez le saumon atlantique contaminé par *A. salmonicida*.
- On ne connaît pas les doses infectieuses et létales minimales d'*A. salmonicida* chez le saumon rouge.
- La variabilité et les lacunes dans les connaissances sur les voies de migration précises du saumon rouge juvénile du fleuve Fraser dans la région des îles Discovery.
- Le manque de données pour estimer précisément la proportion de la population qui serait exposée et infectée par *A. salmonicida* disséminée à partir d'une ferme d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery.

6.2 ÉVALUATION DES CONSÉQUENCES

Les principales incertitudes dans les évaluations des conséquences sur l'abondance et la diversité résultaient des éléments suivants :

- L'absence d'un modèle de propagation de la maladie dans les populations de poissons migrants.
- Le manque de données sur la mortalité due à la furonculose chez le saumon rouge sauvage et les autres espèces sensibles.
- Le manque de connaissances sur les conséquences au niveau de la population résultant des infections sublétales à *A. salmonicida*.

7 CONCLUSIONS

L'évaluation a permis de conclure que la bactérie *A. salmonicida* attribuable aux fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery pose un risque minime pour l'abondance et la diversité du saumon rouge du fleuve Fraser compte tenu des pratiques actuelles de gestion de la santé du poisson.

Deux facteurs principaux ont influencé l'attribution d'un risque minime. Tout d'abord, on a déterminé qu'il est très peu probable que des poissons sensibles soient contaminés par la

bactérie *A. salmonicida* disséminée à partir d'une ferme d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery. Ensuite, même dans le cas très improbable où un poisson sauvage sensible serait contaminé par la bactérie *A. salmonicida* disséminée à partir des fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery, l'infection ne devrait pas se propager dans les populations sauvages, ce qui fait que l'ampleur des conséquences sur l'abondance et la diversité du saumon rouge du fleuve Fraser serait négligeable.

Il existe des sources considérables d'incertitude associées à la détermination du risque pour le saumon rouge du fleuve Fraser posé par le transfert de *A. salmonicida* à partir des fermes d'élevage de saumon atlantique dans les îles Discovery. Les principales incertitudes sont liées aux évaluations : 1) de la probabilité d'infection des poissons sauvages pour lesquels on manque de renseignements sur les taux d'excrétion chez les porteurs de la bactérie *A. salmonicida*, les interactions des populations sauvages avec les fermes d'élevage de saumon atlantique, et la dose infectieuse et létale minimale de la bactérie *A. salmonicida* chez le saumon rouge et les autres espèces sensibles; et 2) des conséquences pour lesquelles il n'existe pas de données sur la mortalité due à la furunculose chez les poissons sauvages sensibles, la propagation de l'infection dans les populations de poissons migrateurs, et les conséquences au niveau de la population résultant d'infections sublétales. Il conviendrait de revoir les conclusions de la présente évaluation du risque à mesure que les résultats de nouvelles recherches viendront combler des lacunes dans les connaissances ou si les conditions venaient à changer.

8 RÉFÉRENCES CITÉES

- Allen, L. J. S., Jang, S. R. and Roeger, L.-I. 2017. Predicting population extinction or disease outbreaks with stochastic models. *Letters in Biomathematics* 4(1): 1-22.
- Beacham, T. D., Beamish, R. J., Candy, J. R., Wallace, C., Tucker, S., Moss, J. H. and Trudel, M. 2014. Stock-specific migration pathways of juvenile sockeye salmon in British Columbia waters and in the Gulf of Alaska. *Trans. Am. Fish. Soc.* 143(6): 1386-1403.
- Beacham, T. D. and Evelyn, T. P. T. 1992. Genetic variation in disease resistance and growth of Chinook, coho, and chum salmon with respect to vibriosis, furunculosis, and bacterial kidney disease. *Trans. Am. Fish. Soc.* 121(4): 456-485.
- Bernoth, E.-M. 1997. Chapter 1 - Furunculosis: the history of the disease and of disease research. *In* Furunculosis. Academic Press, San Diego. pp 1-20.
- Boily, F., Malcolm, G. and Johnson, S. C. 2019. [Caractérisation de la bactérie *Aeromonas salmonicida* et de la furunculose pour informer les évaluations des risques de transfert d'agents pathogènes en Colombie-Britannique](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech. 2019/016. vi + 46 p.
- Bravender, B. A., Anderson, S. S. and Van Tine, J. 1999. Distribution and abundance of juvenile salmon in Discovery Harbour Marina and surrounding area, Campbell River, B.C., during 1996. *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.* 2292. 45 p.
- Brown, T. J., Kask, B. A., McAllister, C. D., Macdonald, J. S. and Levings, C. D. 1984. Salmonid catch-data from Campbell River and Discovery Passage, 1984. *Can. Data Rep. Fish. Aquat. Sci.* 497. iii + 79 p.
- Brown, T. J., McAllister, C. D. and Kotyk, M. 1987. A summary of the salmonid catch - Data from Campbell River Estuary and Discovery Passage for the years 1982 to 1986. *Can. Data Rep. Fish. Aquat. Sci.* 650. 99 p.

-
- CFIA. 2018a. [Federally Reportable Aquatic Animal Diseases in Canada - 2018](#).
- CFIA. 2018b. [Veterinary biologics licensed in Canada](#).
- Chandler, P. C., Foreman, M. G. G., Ouellet, M., Mimeault, C. and Wade, J. 2017. [Oceanographic and environmental conditions in the Discovery Islands, British Columbia](#). DFO Can. Sci. Adv. Sec. Res. Doc. 2017/071. viii + 51 p.
- Cipriano, R. C. and Heartwell, C. M. 1986. Susceptibility of salmonids to furunculosis: differences between serum and mucus responses against *Aeromonas salmonicida*. Trans. Am. Fish. Soc. 115(1): 83-88.
- Cohen, B. I. 2012a. Recommendations, summary, process. In The uncertain future of Fraser River Sockeye. Minister of Public Works and Government Services Canada. Publishing and Depository Services, Ottawa, ON. Vol 3: 211 p.
- Cohen, B. I. 2012b. The sockeye fishery. The Uncertain Future of Fraser River Sockeye. Vol. 1. Minister of Public Works and Government Services Canada, Publishing and Depository Services, Ottawa, ON. 687 p.
- Cox, L. A. T. J. 2008. What's wrong with risk matrices? Risk. Anal. 28(2): 497-512.
- Cudmore, B., Mandrak, N. E., Dettmers, J., Chapman, D. C. and Kolar, C. S. 2012. [Binational Ecological Risk Assessment of Bigheaded Carps \(*Hypophthalmichthys* spp.\) for the Great Lakes Basin](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2011/114. vi + 57 p.
- Effendi, I. and Austin, B. 1991. Survival of the fish pathogen *Aeromonas salmonicida* in seawater. FEMS Microbiol. Lett. 84(1): 103-106.
- Effendi, I. and Austin, B. 1994. Survival of the fish pathogen *Aeromonas salmonicida* in the marine environment. J. Fish Dis. 17(4): 375-385.
- Ellis, T., Bagwell, N., Pond, M., Baynes, S. and Scott, A. P. 2007. Acute viral and bacterial infections elevate water cortisol concentrations in fish tanks. Aquaculture 272(1-4): 707-716.
- Enger, Ø., Gunnlaugsdottir, B., Thorsen, B. K. and Hjeltne, B. 1992. Infectious load of *Aeromonas salmonicida* subsp. *salmonicida* during the initial phase of a cohabitant infection experiment with Atlantic salmon, *Salmo salar* L. J. Fish Dis. 15(5): 425-430.
- Enger, Ø. and Thorsen, B. K. 1992. Possible ecological implication of the high cell surface hydrophobicity of the fish pathogen *Aeromonas salmonicida*. Can. J. Microbiol. 38: 1048-1052.
- Evelyn, T. P. T. 1971. Aberrant strain of bacterial fish pathogen *Aeromonas salmonicida* isolated from a marine host, sablefish (*Anoplopoma fimbria*), and from 2 species of cultured Pacific salmon. J. Fish. Res. Board Can. 28(10): 1629-1634.
- FAO. 2008. Understanding and applying risk analysis in aquaculture. In FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper 519. Rome, Italy. 304 p.
- Ferguson, N. M., Donnelly, C. A. and Anderson, R. M. 2001. The foot-and-mouth epidemic in Great Britain: pattern of spread and impact of interventions. Science 292(5519): 1155-1160.
- Foreman, M. G. G., Chandler, P. C., Stucchi, D. J., Garver, K. A., Guo, M., Morrison, J. and Tuele, D. 2015. [The ability of hydrodynamic models to inform decisions on the siting and management of aquaculture facilities in British Columbia](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2015/005. vii + 49 p.
-

-
- Fraser, D. I., Munro, P. D. and Smail, D. A. 2006. Disinfection guide version IV: practical steps to prevent the introduction and minimise transmission of diseases of fish. *In* Fisheries Research Services Internal Report No 13/06. Aberdeen, Scotland, UK. 25 p.
- Freshwater, C., Trudel, M., Beacham, T. D., Gauthier, S., Johnson, S. C., Neville, C. E. and Juanes, F. 2019. Individual variation, population-specific behaviours and stochastic processes shape marine migration phenologies. *J. Anim. Ecol.* 88(1): 67-78.
- Freshwater, C., Trudel, M., Beacham, T. D., Grant, S. C. H., Johnson, S. C., Neville, C. E. M., Tucker, S. and Juanes, F. 2017. Effects of density during freshwater and early marine rearing on juvenile sockeye salmon size, growth, and migration. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 579: 97-110.
- Gale, P., Brouwer, A., Ramnial, V., Kelly, L., Kosmider, R., Fooks, A. R. and Snary, E. L. 2010. Assessing the impact of climate change on vector-borne viruses in the EU through the elicitation of expert opinion. *Epidemiol. Infect.* 138(2): 214-225.
- GESAMP. 2008. Assessment and communication of environmental risks in coastal aquaculture. *In* Reports and Studies GESAMP. Rome, Italy. FAO 76: 198 p.
- Gillespie, D. T. and Petzold, L. R. 2003. Improved leap-size selection for accelerated stochastic simulation. *J. Chem. Phys.* 119(16): 8229-8234.
- Grant, A. A. M. and Jones, S. R. M. 2010. [Pathways of effects between wild and farmed finfish and shellfish in Canada: potential factors and interactions impacting the bi-directional transmission of pathogens](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2010/018. vi + 58 p.
- Grant, S. C. H., Holt, C., Wade, J., Mimeault, C., Burgetz, I. J., Johnson, S. and Trudel, M. 2018. [Summary of Fraser River Sockeye Salmon \(*Oncorhynchus nerka*\) ecology to inform pathogen transfer risk assessments in the Discovery Islands, British Columbia](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2017/074. v + 30 p.
- Groot, C. and Cooke, K. 1987. Are the migrations of juvenile and adult Fraser River sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) in near-shore waters related? *Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.* 96: 53-60.
- Groot, C. and Margolis, L. 1991. Pacific salmon life histories. University of British Columbia Press, Vancouver, B. C. 564 p.
- Hiney, M. 1995. Detection of stress inducible furunculosis in salmonids vaccinated with water and oil-based furunculosis vaccines. *Bull. Eur. Ass. Fish Pathol.* 15(3): 98-99.
- Hiney, M. and Olivier, G. 1999. Furunculosis (*Aeromonas salmonicida*). *In* Fish diseases and disorders. Woo, P. T. K. and Bruno, D. W. (eds.). Vol 3: pp 341-425.
- ISO. 2009. Risk management - Risk assessment techniques. *In* International Standard. IEC/FDIS 31010. 90 p.
- Johansen, L. H., Jensen, I., Mikkelsen, H., Bjørn, P. A., Jansen, P. A. and Bergh, Ø. 2011. Disease interaction and pathogens exchange between wild and farmed fish populations with special reference to Norway. *Aquaculture* 315: 167-186.
- Johnson, B. 2016. Development and evaluation of a new method for assessing migration timing of juvenile Fraser River sockeye salmon in their early marine phase. Undergraduate Thesis. University of Northern British Columbia. 33 p.
- Keeling, M. J. and Rohani, P. 2007. Modeling infectious diseases in humans and animals. Princeton University Press, Princeton, New Jersey. 408 p.

-
- Kent, M. 2011. Infectious diseases and potential impacts on survival of Fraser River sockeye salmon. *In* Cohen Commission Technical Report. 1: 58 p.
- Kent, M. L. 1992. Diseases of seawater netpen-reared salmonid fishes in the Pacific Northwest. *Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.* Vol. 116. DFO. PBS, Nanaimo, BC. 1-76 p.
- Laurin, E., Jaramillo, D., Vanderstichel, R., Ferguson, H., Kaukinen, K., Schulze, A. D., Keith, I., Gardner, I. and Miller, K. M. 2019. Histopathological and novel high-throughput molecular monitoring data from farmed salmon (*Salmo salar* and *Oncorhynchus* spp.) in British Columbia, Canada, from 2011-2013. *Aquaculture* 499: 220-234.
- Levings, C. D. and Kotyk, M. 1983. Results of two boat trawling for juvenile salmonids in Discovery Passage and nearby channels, Northern Strait of Georgia. *Can. Man. Rep. Fish. Aquat. Sci.* No. 1730. 55 p.
- Lund, M. 1967. A study of the biology of *Aeromonas salmonicida*. Thesis (MSc Thesis) Department of Agriculture, University of Newcastle-upon-Tyne.
- MacDiarmid, S. C. 1994. The risk of introducing exotic diseases of fish into New Zealand through the importation of ocean-caught Pacific salmon from Canada. Ministry of Agriculture and Fisheries New Zealand. 161 p.
- Mandrak, N. E., Cudmore, B. and Chapman, P. M. 2012. [National Detailed-Level Risk Assessment Guidelines: Assessing the Biological Risk of Aquatic Invasive Species in Canada](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2011/092. vi + 17 p.
- Manzer, J. I. 1955. Pink and chum salmon tagging experiments in Johnstone Straits and Discovery Passage, 1953. Biological Station, Fisheries Research Board of Canada, Nanaimo, BC. 35 p.
- McCarthy, D. 1983. An experimental model for fish furunculosis caused by *Aeromonas salmonicida*. *J. Fish Dis.* 6(3): 231-237.
- McCarthy, D. H. 1977. Some ecological aspects of the bacterial fish pathogen - *Aeromonas salmonicida*. *In* Aquatic microbiology. Academic Press. Vol. 6: pp 299-324.
- Midtlyng, P. 1997. Vaccination against furunculosis. *In* Furunculosis: multidisciplinary fish disease research. Bernoth, E. M., Ellis, A. E., Midtlyng, P., Olivier, G. and Smith, P. (eds.). Academic Press, San Diego. pp 382-404.
- Mimeault, C., Jones, S.R.M., Wade, J., Aubry, P., Johnson, S., Foreman, M.G.G., Garver, K.A., Holt, C., Boily, F., Burgetz, I.J. et Parsons, G.J. 2020. [Évaluation du risque pour le saumon rouge du fleuve Fraser attribuable au transfert de la bactérie *Piscirickettsia salmonis* à partir des fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery \(Colombie-Britannique\)](#). Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech. 2019/021. ix + 63 p.
- Mimeault, C., Wade, J., Foreman, M. G. G., Chandler, P. C., Aubry, P., Garver, K. A., Grant, S. C. H., Holt, C., Jones, S., Johnson, S., Trudel, M., Burgetz, I. J. and Parsons, G. J. 2017. [Assessment of the risk to Fraser River Sockeye Salmon due to Infectious Hematopoietic Necrosis Virus \(IHNV\) transfer from Atlantic Salmon farms in the Discovery Islands, British Columbia](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2017/075. vii + 75 p.
- MPO. 2015. [Permis d'aquaculture de poissons marins en vertu de la Loi sur les pêches](#). Division de la gestion de l'aquaculture.
- MPO. 2018a. [Épisodes de mortalité dans des sites de piscicultures marine de la Colombie-Britannique 2011 et en cours](#). Pêches et Océans Canada.
-

-
- MPO. 2018b. [Événements liés à la santé du poisson signalés sur des sites de pisciculture marine de la Colombie-Britannique 2016 et en cours](#). Pêches et Océans Canada.
- MPO. 2018c. [Résultats des vérifications de la santé du poisson effectuées par le MPO pour chaque installation des sites d'aquaculture de poissons marins de la Colombie-Britannique](#). Pêches et Océans Canada.
- Munro, A. L. S. and Waddell, I. F. 1984. Furunculosis: experience of its control in the sea water cage culture of Atlantic salmon in Scotland. Int. Counc. Explor. Sea Coop. Res. Rep. F(32): 1-9.
- Nero, R. W. and Huster, M. 1996. Low frequency acoustic imaging of Pacific salmon on the high seas. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 53: 2513-2523.
- Neville, C. M., Johnson, S. C., Beacham, T. D., Whitehouse, T., Tadey, J. and Trudel, M. 2016. Initial estimates from an integrated study examining the residence period and migration timing of juvenile sockeye salmon from the Fraser River through coastal waters of British Columbia. NPAFC Bull. 6: 45-60.
- Neville, C. M., Trudel, M., Beamish, R. J. and Johnson, S. C. 2013. The early marine distribution of juvenile sockeye salmon produced from the extreme low return in 2009 and the extreme high return in 2010. North Pacific Anadromous Fish Commission 9: 65-68.
- Ogut, H. 2001. Biological and mathematical modeling of dynamics of furunculosis in Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) and infectious hematopoietic necrosis (IHN) in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Thesis (Fisheries Sciences, PhD) Oregon State University. 193 p.
- Ogut, H., LaPatra, S. E. and Reno, P. W. 2005. Effects of host density on furunculosis epidemics determined by the simple SIR model. Prev. Vet. Med. 71(1-2): 83-90.
- Ogut, H. and Reno, P. 2004. Prevalence of furunculosis in Chinook salmon depends on density of the host exposed by cohabitation. N. Am. J. Aquacult. 66(3): 191-197.
- Ogut, H. and Reno, P. W. 2005. Evaluation of an experimental *Aeromonas salmonicida* epidemic in Chinook salmon, *Oncorhynchus tshawytscha* (Walbaum). J. Fish Dis. 28: 263-269.
- Ogut, H., Reno, P. W. and Sampson, D. 2004. A deterministic model for the dynamics of furunculosis in Chinook salmon *Oncorhynchus tshawytscha*. Dis. Aquat. Org. 62: 57-63.
- OIE. 2010. Handbook on import risk analysis for animal and animal products. Introduction to qualitative risk analysis. Introduction and qualitative risk analysis. 2nd ed. Vol. 1. The World Organisation for Animal Health, Paris, France. 100 p.
- Pacific Salmon Commission. 2017. Report of the Fraser River Panel to the Pacific Salmon Commission on the 2016 Fraser River Sockeye Salmon fishing season. In Annual Reports of the Fraser River Panel to Pacific Salmon Commission. Vancouver, BC. 1-61 p.
- Pacific Salmon Commission. 2018. Report of the Fraser River Panel to the Pacific Salmon Commission on the 2017 Fraser River Sockeye and Pink Salmon fishing season. In Annual Reports of the Fraser River Panel to the Pacific Salmon Commission. Vancouver, BC. 1-79 p.
- Pérez, M. J., Fernández, A. I. G., Rodríguez, L. A. and Nieto, T. P. 1996. Differential susceptibility to furunculosis of turbot and rainbow trout and release of the furunculosis agent from furunculosis-affected fish. Dis. Aquat. Org. 26: 133-137.
-

-
- R Core Team. 2018. [R: A language and environment for statistical computing](#). R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.
- Rechisky, E. L., Stevenson, C., Porter, A. D., Welch, D. W., Furey, N. B., Healy, S., Johnston, S. and Hinch, S. G. 2018. Telemetry-based estimates of early marine survival and residence time of juvenile sockeye salmon in the Strait of Georgia and Queen Charlotte Strait, 2017. *In* State of the physical, biological and selected fishery resources of Pacific Canadian marine ecosystems in 2017. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 3266. viii + 245 p.
- Reno, P. W. 1998. Factors involved in the dissemination of disease in fish populations. J. Aquat. Anim. Health 10(2): 160-171.
- Roberts, R. J. 2012. The bacteriology of teleosts. *In* Fish Pathol. Wiley-Blackwell. pp 339-382.
- Rose, A. S. 1990. Epidemiological aspects of *Aeromonas salmonicida* in the marine environment. Thesis (PhD) Institute of Aquaculture, University of Stirling. Stirling, Scotland. 229 p.
- Rose, A. S., Ellis, A. E. and Munro, A. L. S. 1989. The infectivity by different routes of exposure and shedding rates of *Aeromonas salmonicida* subsp. *salmonicida* in Atlantic salmon, *Salmo salar* L., held in sea water. J. Fish Dis. 12: 573-578.
- Rose, A. S., Ellis, A. E. and Munro, A. L. S. 1990a. Evidence against dormancy in the bacterial fish pathogen *Aeromonas salmonicida* subsp. *salmonicida*. FEMS Microbiol. Lett. 68(1-2): 105-107.
- Rose, A. S., Ellis, A. E. and Munro, A. L. S. 1990b. The survival of *Aeromonas salmonicida* subsp. *salmonicida* in sea water. J. Fish Dis. 13(3): 205-214.
- Rousseau, S., Gauthier, S., Johnson, S., Neville, C. and Trudel, M. 2017. Use of inverted echosounders to monitor the migration timing and abundance of juvenile salmon in the Discovery Islands, British Columbia. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 3227. viii + 33 p.
- Smith, P. R., Brazil, G. M., Drinan, E. M., O'Kelly, J., Palmer, R. and Scallan, A. 1982. Lateral transmission of furunculosis in sea water. Bull. Eur. Assoc. Fish Pathol. 3: 41-42.
- Stoddard, E. M. 1993. Fraser River sockeye health study 1993 field collection, and bacteriological, virological and histological analysis of data collected: final report. EMS Aquatic Services, Vancouver, B.C. 23 p.
- Taranger, G. L., Karlsen, Ø., Bannister, R. J., Glover, K. A., Husa, V., Karlsbakk, E., Kvamme, B. O., Boxaspen, K. K., Bjorn, P. A., Finstad, B., Madhun, A. S., Morton, H. C. and Svasand, T. 2015. Risk assessment of the environmental impact of Norwegian Atlantic salmon farming. ICES J. Mar. Sci. 72(3): 997-1021.
- USDA. 2014. [Vaccines for aquaculture](#). Technical evaluation report.
- Vose, D. 2008. Risk analysis: a quantitative guide. 3rd ed. Wiley, Chichester, England. 735 p.
- Wade, J. 2017. [British Columbia farmed Atlantic Salmon health management practices](#). DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2017/072. vi + 55 p.
- Ware, D. M. and McFarlane, G. A. 1989. Fisheries production domains in the northeast Pacific ocean. *In* Effects of ocean variability on recruitment and an evaluation of parameters used in stock assessment models. Beamish, R. J. and McFarlane, G. A. (eds.). Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci. 108: pp 359-379.
- Wickham, H., Chang, W., Henry, L., Pedersen, T. L., Takahashi, K., Wilke, C. and Woo, K. 2018. [Package 'ggplot2': create elegant data visualizations using the grammar of graphics](#).
-

-
- Wiklund, T. and Dalsgaard, I. 1998. Occurrence and significance of atypical *Aeromonas salmonicida* in non-salmonid and salmonid fish species: a review. *Dis. Aquat. Org.* 32: 49-69.
- Yi, M. M., Du, Y. S., Chi, L., Sun, G. X., Li, X. and Liu, Y. 2016. The impact of *Aeromonas salmonicida* infection on behaviour and physiology of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Aquacult. Res.* 47(7): 2287-2296.
- Zetterberg, P. R. and Carter, E. W. 2010. Strait of Georgia sport fishery creel survey statistics for salmon and groundfish, 2008. *Can. Manuscr. Rep. Fish. Aquat. Sci.* 2929. xiv + 123 p.
- Zetterberg, P. R., Watson, N. M. and O'Brian, D. S. 2012. Strait of Georgia recreational fishery statistics for salmon and groundfish, 2009. *Can. Manuscr. Rep. Fish. Aquat. Sci.* 2979. xii + 104 p.

9 ANNEXES

9.1 ANNEXE A : PROGRAMME DE VÉRIFICATION ET DE SURVEILLANCE DE LA SANTÉ DES POISSONS

La présente section résume les diagnostics de la furonculose au niveau de la ferme, basés sur les vérifications, dans les fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery, ce qui comprend toutes les fermes de la zone de surveillance de la santé des poissons 3-2 et trois de la zone 3-3 (Hardwicke, Althorpe et Shaw Pointe).

Entre 2004 et 2016, 14 fermes ont été empoissonnées en moyenne par an, allant de 8 en 2013 à 18 en 2009 (Tableau 18). Entre 2002 et 2016, 245 vérifications ont été réalisées. De 2004 à 2011, entre 25 et 88 % des fermes ont fait l'objet d'une vérification annuelle. De 2012 à 2016, la plupart des fermes actives ont fait l'objet d'une vérification chaque année (80 à 100 %).

Entre 2002 et 2016, aucun diagnostic de furonculose au niveau de la ferme, selon une vérification, n'a été déclaré dans les fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery.

Tableau 18. Sommaire des fermes d'élevage de saumon atlantique actives, du nombre de vérifications effectuées et de diagnostics de la furonculose au niveau de la ferme, dans les fermes d'élevage de saumon atlantique situées dans la région des îles Discovery (zone de surveillance de la santé des poissons 3-2 et trois fermes à proximité dans la zone de surveillance de la santé des poissons 3-3), entre 2002 et 2016. Le nombre de fermes actives représente le nombre total de fermes d'élevage de saumon atlantique ayant des poissons sur place à un moment quelconque de l'année. Sources : MPO (2018c), données fournies par la Division de la gestion de l'aquaculture du MPO et la BC Salmon Farmers Association. S. O. : données non disponibles.

Année	Nombre de fermes actives	Nombre de vérifications	Nombre de fermes ayant fait l'objet d'une vérification	Pourcentage de fermes ayant fait l'objet d'une vérification	Nombre de vérifications ayant donné lieu à des diagnostics de la furonculose au niveau de la ferme	Nombre de fermes ayant reçu un diagnostic de la furonculose au niveau de la ferme
2002	S. O.	3	3	S. O.	0	0
2003	S. O.	10	4	S. O.	0	0
2004	14	13	9	64	0	0
2005	15	18	11	73	0	0
2006	16	19	12	75	0	0
2007	16	24	13	81	0	0
2008	17	28	15	88	0	0
2009	18	23	14	78	0	0
2010	16	4	4	25	0	0
2011	17	13	8	47	0	0
2012	13	23	12	93	0	0
2013	8	12	7	88	0	0
2014	10	16	8	80	0	0
2015	10	18	9	90	0	0
2016	11	21	11	100	0	0
Total	---	245	---	---	0	0

9.2 ANNEXE B : ÉVÉNEMENTS LIÉS À LA SANTÉ DES POISSONS ATTRIBUÉS À LA FURONCULOSE

La présente section résume les ESP attribués à la furunculose dans les fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery.

Entre 2004 et 2017, on comptait 14 fermes actives en moyenne par an, allant de 8 en 2013 à 18 en 2009. Entre 2002 et 2016, 245 vérifications au total ont été réalisées; le plus grand nombre (n = 34) a eu lieu en janvier et le plus petit (n = 8), en mars (Mimeault *et al.*, 2020).

Entre 2002 et la fin de 2017, six événements liés à la santé des poissons, dans six fermes au total, ont été déclarés dans les fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery (annexe A).

Tableau 19. Nombre de fermes d'élevage de saumon atlantique actives dans la région des îles Discovery et d'événements liés à la santé des poissons (ESP) attribués à la furunculose de 2002 à 2017. Le nombre de fermes actives représente le nombre total de fermes d'élevage de saumon atlantique ayant des poissons sur place à un moment quelconque de l'année. Sources : MPO (2018c), Division de la gestion de l'aquaculture du MPO et BC Salmon Farmers Association. S. O. : données non disponibles. Le nombre total de fermes (dernière ligne) représente le nombre de fermes différentes.

Année	Nombre de fermes actives	Nombre d'ESP attribués à la furunculose	Nombre de fermes ayant déclaré des ESP attribués à la furunculose
2002	S. O.	0	0
2003	S. O.	1	1
2004	14	0	0
2005	15	0	0
2006	16	0	0
2007	16	0	0
2008	17	0	0
2009	18	1	1
2010	16	2	2
2011	17	0	0
2012	13	0	0
2013	8	1	1
2014	10	0	0
2015	10	0	0
2016	11	0	0
2017	12	1	1
Total	---	6	6

9.3 ANNEXE C : SURVEILLANCE ET DÉPISTAGE EFFECTUÉS PAR L'INDUSTRIE

Les tests de dépistage des agents pathogènes bactériens non exigeants, notamment *A. salmonicida*, effectués par l'industrie sont réalisés selon des procédures bactériologiques standards. Toutes les entreprises inoculent des échantillons de reins prélevés sur des poissons moribonds euthanasiés et sur des poissons morts récemment sur des milieux de gélose tryptone-soja (TSA) pour le dépistage bactériologique de routine. D'autres tissus, avec ou sans lésions, sont également prélevés sur ces poissons et cultivés en fonction des besoins. D'autres milieux de culture peuvent également être utilisés. Des procédures internes supplémentaires (sous-cultures bactériennes de colonies suspectes, coloration de Gram et tests biochimiques) peuvent être effectuées pour fournir des informations permettant d'identifier une espèce d'agent pathogène, ou l'échantillon peut être envoyé à un laboratoire de diagnostic externe pour le dépistage ou l'identification d'agents pathogènes bactériens. Bien que les essais par PCR soient sensibles et utiles pour détecter *A. salmonicida* (ou ses composantes) dans un échantillon, les cultures bactériennes ont l'avantage de permettre l'isolement et l'identification des souches impliquées (typiques, atypiques) ainsi que de déterminer la sensibilité des isolats aux antibiotiques.

La bactérie *Aeromonas salmonicida* a été trouvée occasionnellement dans des fermes marines de saumon atlantique de la région des îles Discovery. D'après les données disponibles, *A. salmonicida* a été déclarée dans au moins un échantillon de deux fermes en 2013, d'une ferme en 2014 et d'une ferme en 2017 (Tableau 20). Ces détections de la bactérie *A. salmonicida* ont eu lieu dans trois fermes différentes; l'une d'elles a déclaré des poissons infectés par *A. salmonicida* au cours de deux années différentes.

Le diagnostic de présomption de la bactérie *A. salmonicida* repose sur des cultures bactériologiques de reins (avec ou sans tissus supplémentaires) sur des milieux TSA (des milieux supplémentaires peuvent être utilisés selon les procédures de chaque entreprise), suivies d'un isolement bactérien et de tests additionnels effectués en interne ou par un laboratoire de diagnostic externe. L'industrie a déclaré des souches typiques (pigmentaires) et atypiques (non pigmentaires). Le dépistage bactériologique par l'industrie a été effectué dans les 18 fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery entre 2011 et 2017.

Tableau 20. Sommaire des résultats du dépistage par l'industrie de la bactérie *Aeromonas salmonicida* par culture bactériologique, histologie ou réaction en chaîne de la polymérase (PCR) entre 2011 et 2017 dans les fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery. Aucun échantillon n'a été jugé positif pour *A. salmonicida* en fonction des résultats de l'histologie uniquement.

Année	Nombre de visites de sites avec		Nombre de fermes avec	
	au moins un échantillon positif (culture et PCR) pour <i>A. salmonicida</i>	des tests de dépistage de la bactérie <i>A. salmonicida</i>	au moins un échantillon positif (culture, PCR) pour <i>A. salmonicida</i>	des tests de dépistage de la bactérie <i>A. salmonicida</i>
2011	0	19	0	11
2012	0	14	0	6
2013	2	8	2	7
2014	1	30	1	7
2015	0	9	0	6
2016	0	76	0	11
2017	5	49	1	10

9.4 ANNEXE D : MODÈLE DE DISPERSION DE LA BACTÉRIE *AEROMONAS SALMONICIDA*

La dispersion de la bactérie *A. salmonicida* à partir des fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery a été modélisée à l'aide des modèles de circulation océanique et de dispersion et d'inactivation des particules de Foreman *et al.* (2012) et Foreman *et al.* (2015a), selon les hypothèses et calculs suivants :

- Il a été supposé que les dimensions de chacune des fermes mesuraient 100 m sur 100 m sur 20 m (200 000 m³).
- Le modèle suppose que les 18 fermes ont été contaminées et ont rejeté des particules de la bactérie *A. salmonicida* simultanément.
- Trente particules (cohorte d'ufc) ont été rejetées toutes les heures à partir de positions aléatoires dans chaque ferme, et elles ont fait l'objet d'un suivi pendant une période de 26 jours [ce qui représente l'estimation de survie la plus longue pour *A. salmonicida* d'après l'examen de Boily *et al.* (2019)]. Le premier rejet a eu lieu à 1 h UTC le 1^{er} mai et le dernier à 23 h le 29 juin.
- La survie fractionnée de chaque cohorte a été calculée pour chaque heure de sa période de suivi. Ces taux de survie ont ensuite été transposés en réels chiffres en ufc d'après les taux d'excrétion.
- En utilisant le taux d'excrétion estimé au premier jour de l'infection, le facteur de transposition dans le cadre des pratiques actuelles de gestion de la santé des poissons était de $1,96 \times 10^9$ pour chaque cohorte.
- Les concentrations variables dans le temps de la bactérie *A. salmonicida* ont été calculées pour chacun des quelque 65 000 éléments de la grille du modèle de circulation comme étant le nombre d'ufc dans chaque élément horizontalement et une tranche d'eau prescrite verticalement. Compte tenu du nombre relativement faible de rejets de cohortes (en raison des limitations informatiques) et de leur dispersion ultérieure dans les chenaux de la région des îles Discovery, les valeurs de la concentration variaient en fonction des zones des éléments.

9.5 ANNEXE E : PROPORTION DE LA POPULATION POTENTIELLEMENT EXPOSÉE

La présente annexe détaille l'estimation de la proportion de la population de saumon rouge du fleuve Fraser, juvéniles et adultes, qui pourrait se trouver dans la région des îles Discovery pendant la même période que celle où les infections à *A. salmonicida* ou les cas de furunculose ont été signalés dans des fermes d'élevage de saumon atlantique.

Ces estimations supposent que les poissons migrateurs rencontreront une ou des fermes contaminées, c'est-à-dire que les poissons emprunteront les voies sur lesquelles celles-ci se trouvent. Toutefois, comme il existe des voies de migration dans la région des îles Discovery où il n'y a pas de ferme d'élevage de saumon atlantique, et que l'emplacement et le nombre des fermes contaminées simultanément seront des aspects critiques pour évaluer l'exposition réelle aux fermes contaminées, l'analyse suivante fournit une surestimation de la proportion de la population exposée à des fermes contaminées dans la zone des îles Discovery pendant les périodes où des infections à *A. salmonicida* ou la furunculose ont été détectées dans une ou plusieurs fermes.

9.5.1 Juvéniles

La proportion de saumons rouges juvéniles qui pourraient être exposés à des fermes contaminées par *A. salmonicida* dans la région des îles Discovery pendant leur migration a été estimée en fonction des éléments suivants :

- La période de la dévalaison des saumons rouges juvéniles du fleuve Fraser.
- Le nombre pondéré de mois pour lesquels on dispose de preuves de l'infection à *A. salmonicida* et pendant lesquels les juvéniles pourraient se trouver dans les environs des fermes contaminées, chaque année, entre 2002 et 2017.

Les saumons rouges juvéniles du fleuve Fraser de type lacustre ont tendance à migrer par les îles Discovery de la mi-mai à la mi-juillet, avec un pic de prises entre le début et le milieu du mois de juin (Grant *et al.*, 2018). Nous avons utilisé les données brutes d'une étude sur trois ans (2014-2016) de la dévalaison du saumon rouge du fleuve Fraser, menée par Freshwater *et al.* (2019) de la mi-mai à la mi-juillet, pour calculer la distribution temporelle des juvéniles capturés autour de la région des îles Discovery. Selon cet ensemble de données, 30 %, 62 % et 8 % des juvéniles ont été capturés en mai, juin et juillet, respectivement, ce qui concorde avec d'autres études indiquant que le pic de migration du saumon rouge du fleuve Fraser se produit en juin dans la région des îles Discovery (Neville *et al.*, 2016; Grant *et al.*, 2018).

Ces trois pourcentages ont ensuite été appliqués comme pondérations de la fréquence (c'est-à-dire multipliés par) à chaque état d'infection mensuel correspondant au cours d'une année donnée, entre 2002 et 2017 (Tableau 21). Par exemple, en 2009, comme des fermes étaient contaminées en mai, la pondération respective était de 30 %, mais il n'y a pas eu d'infection en juin et en juillet (zéro). La somme des trois mois pondérés a donc donné une estimation de 30 % de la proportion de juvéniles qui auraient pu se trouver dans la région des îles Discovery au moment d'une infection cette année-là.

Tableau 21. Estimation de la proportion de saumons rouges juvéniles du fleuve Fraser de type lacustre qui auraient pu être exposés à une ou plusieurs fermes d'élevage de saumon atlantique contaminées par *Aeromonas salmonicida* lors de leur migration à travers la région des îles Discovery entre 2002 et 2017. La présence (1) ou l'absence (0) d'infection dans les fermes sont la représentation binaire des données tirées du Tableau 11. La présence/absence pondérée est la présence/absence multipliée par la distribution temporelle estimée des juvéniles dans la région des îles Discovery (30 % pour mai, 62 % pour juin et 8 % pour juillet). La proportion de juvéniles potentiellement exposés est la somme des présences/absences pondérées (de mai à juillet).

Année	Présence (1)/absence (0)			Présence/absence pondérée			Proportion de juvéniles potentiellement exposés
	Mai	Juin	Juillet	Mai	Juin	Juillet	
2002	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
2003	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
2004	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
2005	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
2006	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
2007	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
2008	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
2009	1	0	0	0,30	0,00	0,00	0,30
2010	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
2011	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
2012	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
2013	0	1	0	0,00	0,62	0,00	0,62
2014	0	1	0	0,00	0,62	0,00	0,62
2015	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
2016	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
2017	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00

Compte tenu des preuves de la présence d'*A. salmonicida* dans des fermes d'élevage de saumon atlantique de la région des îles Discovery et de la distribution de fréquence pondérée fondée sur la période de la migration, la proportion de saumons rouges juvéniles du fleuve Fraser qui auraient pu se trouver dans la région lorsque la bactérie *A. salmonicida* était disséminée à partir des fermes d'élevage de saumon atlantique entre 2002 et 2017 (16 ans) variait entre 0 et 62 % (médiane = 0 % et moyenne = 10 %).

Toutefois, dans l'évaluation des conséquences, il faut omettre les années sans preuve de l'infection (13 ans au total) étant donné l'hypothèse selon laquelle au moins un poisson migrateur a été contaminé par la bactérie *A. salmonicida* disséminée à partir d'une ou plusieurs fermes contaminées. Lorsqu'on ne tient compte que des années pour lesquelles on dispose de preuves de la présence de l'infection au moment où les juvéniles traversent la région durant leur migration entre 2002 et 2017 (trois années), la proportion de saumons rouges juvéniles du fleuve Fraser qui auraient pu se trouver dans la région lorsque la bactérie *A. salmonicida* était disséminée à partir des fermes d'élevage de saumon atlantique variait entre 30 et 62 % (médiane = 62 % et moyenne = 51 %). Ces estimations sont fondées sur les preuves de la présence de la bactérie *A. salmonicida* résumées dans le Tableau 11.

9.5.2 Adultes

La proportion de saumons rouges adultes qui pourraient être exposés à des fermes contaminées par *A. salmonicida* dans la région des îles Discovery durant leur montaison dans le fleuve Fraser a été estimée (Tableau 22) d'après les éléments suivants :

-
- Les taux de détournement vers le nord des saumons rouges adultes du fleuve Fraser en montaison, compris entre 10 et 96 % entre 2002 et 2017 [données de la Commission du saumon du Pacifique présentées dans Grant *et al.* (2018) et rapports de 2016 et 2017 du groupe d'experts sur le fleuve Fraser présentés à la Commission du saumon du Pacifique (Pacific Salmon Commission, 2017, 2018)].
 - Le nombre pondéré de mois pour lesquels on dispose de preuves de l'infection par *A. salmonicida* entre les mois de juin et d'octobre (lorsque les adultes se trouvent dans la région des îles Discovery entre 2002 et 2017).

Les saumons rouges du fleuve Fraser en montaison traversent la région des îles Discovery entre la fin du mois de juin et le début du mois d'octobre (Grant *et al.*, 2018). Les estimations de la distribution temporelle des adultes en montaison qui traversent la région des îles Discovery sont fondées sur des données fournies par la Commission du saumon du Pacifique. Les estimations quotidiennes (2003-2017) de l'abondance marine des saumons rouges du fleuve Fraser en montaison, fondées sur les données hydroacoustiques de Mission, y compris toutes les prises en aval de Mission pour les quatre groupes de gestion (Stuart à montaison précoce, montaison estivale précoce, montaison estivale et montaison tardive) ont été fournies par la Commission du saumon du Pacifique. Les dates ont été décalées en fonction de la vitesse de migration présumée pour tenir compte du décalage dans le temps de la migration entre la région des îles Discovery et Mission.

Les estimations de l'abondance ont été résumées pour tous les groupes de gestion par année. Pour chaque année, les valeurs additionnées ont été multipliées par leur taux de détournement vers le nord annuel correspondant, ce qui a donné des estimations de l'abondance du saumon rouge du fleuve Fraser qui migre dans la région des îles Discovery. Enfin, toutes les estimations quotidiennes ont été agrégées sur les 16 années et on a calculé la distribution de fréquence relative des poissons par mois durant la migration dans la région des îles Discovery (disponible de juin à septembre). Étant donné que les pêches expérimentales n'ont pas lieu en octobre, la fréquence relative pour le mois d'octobre a été déterminée comme étant nulle. Cependant, une fréquence relative de 0,1 % a été attribuée au mois d'octobre (estimation prudente) pour tenir compte du très petit nombre de poissons généralement signalés au début du mois dans la région. D'après cet ensemble de données, 0,3 %, 12,2 %, 79,7 %, 7,7 % et 0,1 % des adultes en montaison devraient être présents dans la région des îles Discovery en juin, juillet, août, septembre et octobre, respectivement.

Ces cinq pourcentages ont ensuite été appliqués comme pondérations de la fréquence (c'est-à-dire multipliés par) à chaque état d'infection mensuel correspondant au cours d'une année donnée entre 2002 et 2017 (Tableau 11). Par exemple, en 2017, des fermes étaient contaminées en août, septembre et octobre, ce qui donne la pondération respective de ces mois de 79,7 %, 7,7 % et 0,1 %, mais il n'y a pas eu de contamination en juin et juillet (pondération de zéro). Ainsi, la somme des cinq mois pondérés (87,5 %) multipliée par le taux de détournement vers le nord pour l'année correspondante (71 %) a donné une estimation de la proportion d'adultes qui ont pu être exposés durant cette année de 62 % (Tableau 22).

Tableau 22. Estimation de la proportion de saumons rouges adultes du fleuve Fraser qui auraient pu être exposés à une ou plusieurs fermes d'élevage de saumon atlantique contaminées par *Aeromonas salmonicida* lors de leur migration à travers la région des îles Discovery entre 2002 et 2017. Les taux de détournement vers le nord proviennent de données résumées dans Grant et al. (2018) et de la Pacific Salmon Commission (2017, 2018). La présence (1) ou l'absence (0) d'infection dans les fermes sont la représentation binaire des données tirées du Tableau 11. La présence/absence pondérée est la présence/absence multipliée par la distribution temporelle des adultes en montaison qui traversent la région des îles Discovery (0,3 %, 12,2 %, 79,7 %, 7,7 % et 0,1 % de juin à octobre d'après toutes les prises effectuées en aval de Mission, compensée pour tenir compte du décalage temporel de la migration à partir de la région des îles Discovery). La proportion des adultes potentiellement exposés est la somme de la présence/absence pondérée (de juin à octobre) multipliée par le taux de détournement vers le nord.

Année	Présence (1)/absence (0)					Présence/absence pondérée					Somme de la présence/absence pondérée	Taux de détournement vers le nord	Proportion d'adultes potentiellement exposés
	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.			
2002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,51	0
2003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,69	0
2004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,64	0
2005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,74	0
2006	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,65	0
2007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,44	0
2008	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,10	0
2009	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,47	0
2010	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,73	0
2011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,62	0
2012	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,18	0
2013	1	0	0	0	0	0,003	0	0	0	0	0,003	0,71	0,002
2014	1	0	0	0	0	0,003	0	0	0	0	0,003	0,96	0,003
2015	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,69	0
2016	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,50	0
2017	0	0	1	1	1	0	0	0,797	0,077	0,001	0,875	0,71	0,621

La proportion de saumons rouges du fleuve Fraser adultes en montaison qui auraient pu être présents dans la région des îles Discovery au moment où *A. salmonicida* a été disséminée à partir de fermes d'élevage de saumon atlantique entre 2002 et 2017 (16 ans) variait entre 0 et 62,1 % (médiane = 0 % et moyenne = 3,9 %).

Lorsqu'on ne tient compte que des trois années pour lesquelles on dispose de preuves de la présence de l'infection dans les fermes au moment où les adultes traversent la région durant leur migration entre 2002 et 2017, la proportion de saumons rouges adultes du fleuve Fraser en montaison qui auraient pu se trouver dans la région lorsque la bactérie *A. salmonicida* était disséminée à partir des fermes d'élevage de saumon atlantique variait entre 0,2 et 62 % (médiane = 0,3 % et moyenne = 20,9 %). Ces estimations sont fondées sur les preuves de la présence de la bactérie *A. salmonicida*, y compris les détections à l'échelle du poisson qui sont résumées dans le Tableau 11.

9.6 ANNEXE F : EXPOSITION SUR DEUX GÉNÉRATIONS

Nous avons estimé l'exposition potentielle des populations de saumon rouge du fleuve Fraser à des fermes d'élevage de saumon atlantique contaminées par *A. salmonicida* sur deux générations (huit ans pour le saumon rouge du fleuve Fraser) pour explorer les impacts potentiels sur la diversité.

9.6.1 Approche du processus binomial

Il y a deux résultats d'exposition possibles au cours d'une année donnée pour le saumon rouge du fleuve Fraser pendant sa migration : le saumon migrateur peut être exposé (résultat de réussite) ou non (résultat d'échec). Compte tenu de ces deux résultats possibles, le nombre de réussites (s) sur un nombre donné d'essais (n) peut être estimé à l'aide du processus binomial.

L'évaluation de l'exposition a permis de déterminer qu'entre 2002 et 2017, des preuves de la présence de la bactérie *A. salmonicida* ou de la furunculose pendant les mois où des saumons rouges du fleuve Fraser (juvéniles ou adultes) devraient se trouver dans la région des îles Discovery ont été fournies pour trois années (Tableau 11). En d'autres termes, pour une année donnée, la probabilité que des saumons rouges du fleuve Fraser se trouvent dans les îles Discovery en même temps qu'une ferme est contaminée par *A. salmonicida* est, en moyenne, de 18,75 % (3/16), pour les juvéniles et les adultes.

En supposant que (i) la probabilité d'exposition chaque année est indépendante de la précédente et (ii) que la probabilité d'exposition est constante chaque année, une distribution binomiale a été calculée dans R avec les paramètres d'entrée suivants :

- Probabilité de réussite (P) = 0,1875 pour les juvéniles ou les adultes
- Nombre d'essais (n) = 8 ans, représentant deux générations de saumon rouge du fleuve Fraser

La possibilité que des juvéniles ou des adultes se trouvent dans la région des îles Discovery en même temps qu'une infection par *A. salmonicida* se produit dans une ferme d'élevage de saumon atlantique, d'après le processus binomial expliqué ci-dessus, est la suivante :

- En moyenne, 1,5 année sur les 8 années (moyenne = $n \times P = 8 \times (3/16) = 1,5$, avec $ET = \sqrt{n \times p \times (1 - p)} = 1,1$).
- La Figure 8 indique la distribution de probabilité binomiale cumulative complémentaire, à partir de laquelle la probabilité d'exposition au cours d'un nombre d'années donné au moins est illustrée. Par exemple, la probabilité que les juvéniles (ou les adultes) soient exposés au

moins deux ans sur huit est de 46 %, alors que la probabilité qu'ils soient exposés au moins cinq ans sur huit est de 1 %, etc.

- Sur une génération (quatre ans), la probabilité d'exposition pendant quatre années consécutives est de 0,12 % ($P^4 = 0,1875^4 = 0,0012$).
- Sur deux générations, la probabilité d'exposition pendant au moins quatre années consécutives sur huit est déterminée par la somme des produits des probabilités d'exposition sur au moins quatre ans et des probabilités que ces années soient consécutives. Par conséquent, la probabilité que des juvéniles ou des adultes soient exposés à la bactérie *A. salmonicida* disséminée à partir des fermes d'élevage de saumon atlantique contaminées dans la région des îles Discovery pendant au moins quatre années consécutives sur deux générations est de 0,33 % (Tableau 23).

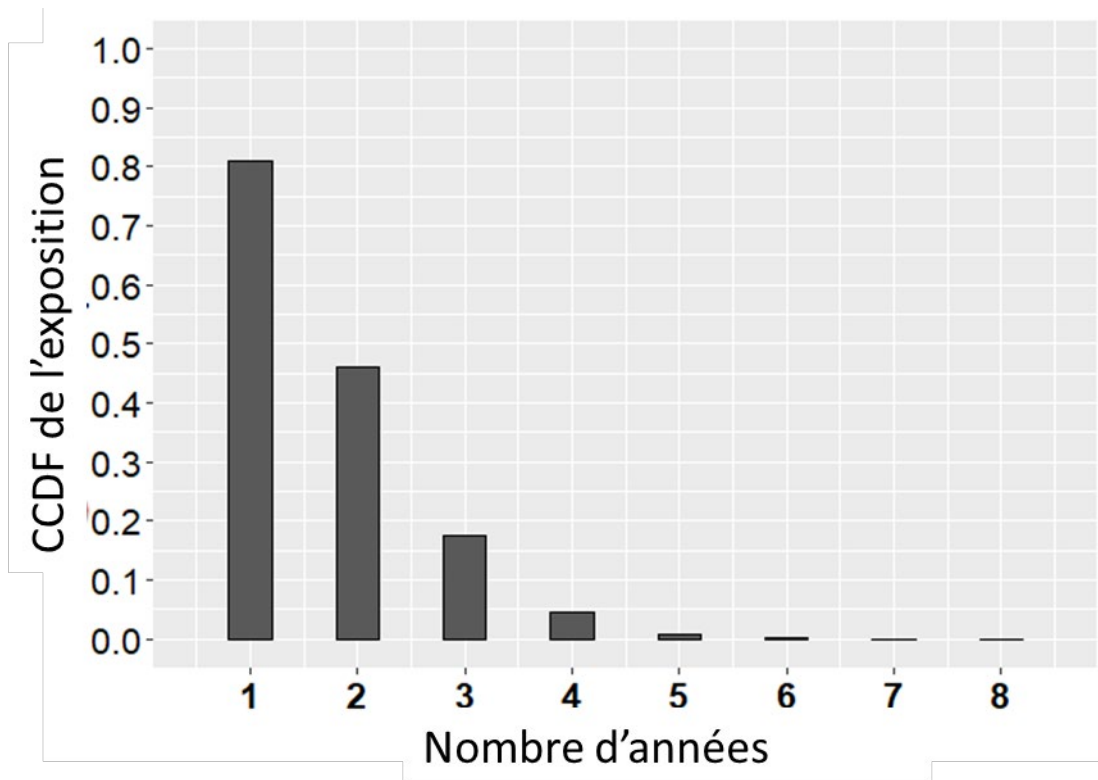


Figure 8. Distribution de probabilité cumulative complémentaire (CCDF) de l'exposition potentielle des saumons rouges juvéniles ou adultes du fleuve Fraser à des fermes d'élevage de saumon atlantique infectées par *Aeromonas salmonicida* dans la région des îles Discovery sur une période de huit ans. La probabilité d'exposition repose sur un processus binomial qui suppose une probabilité de réussite (p) de 0,1875 et un nombre d'essais (n) de huit ans.

Tableau 23. Probabilité d'exposition des saumons rouges juvéniles et adultes du fleuve Fraser à la bactérie *Aeromonas salmonicida* attribuable aux fermes d'élevage de saumon atlantique dans la région des îles Discovery pendant au moins quatre années consécutives sur une période représentant deux générations (huit ans). La probabilité d'exposition repose sur un processus binomial qui suppose que la probabilité de réussite (P) d'un essai individuel (année) est de 0,1875 et que le nombre d'essais (n) est de huit.

(a) Nombre de réussites (x) : nombre d'années avec exposition	(b) Nombre d'essais (n) : nombre d'années pour deux générations	(c) Probabilité binomiale : $P(X = x)$ [exactement x réussites dans n essais]	(d) Nombre de combinaisons consécutives de x dans n *	(e) Nombre de combinaisons distinctes de x dans n **	(f) Probabilité d'avoir exactement x années consécutives en n années ($c \times d / e$)
4	8	0,0377	5	70	0,0027
5	8	0,0070	4	56	0,0005
6	8	0,0008	3	28	$8,6 \times 10^{-5}$
7	8	$5,3 \times 10^{-5}$	2	8	$1,3 \times 10^{-5}$
8	8	$1,5 \times 10^{-6}$	1	1	$1,5 \times 10^{-6}$
Probabilité d'au moins quatre années consécutives en deux générations (huit ans)					0,0033

* Par exemple, avec $x = 4$ et $n = 8$: 1-2-3-4; 2-3-4-5; 3-4-5-6; 4-5-6-7; et 5-6-7-8.

** Par exemple, avec $x = 4$ et $n = 8$: 1-2-3-4; 1-2-3-5; 2-4-6-7; 4-5-7-8; ...; pour un total de 70 combinaisons.

9.6.2 Méthode de simulation

Pour évaluer de façon plus poussée la fiabilité des estimations de l'exposition reposant sur le processus binomial, nous avons appliqué une méthode de simulation. Pour ce faire, nous avons recouru à une stratégie d'échantillonnage avec la méthode bootstrap pour sélectionner au hasard huit années sur les 16 années de l'évaluation (0 : année sans infection, 1 : année avec infection) avec 1 000 et 10 000 itérations. Nous avons calculé la somme des années avec infection (par itération) pour estimer le nombre d'années durant lesquelles des juvéniles et des adultes devraient traverser la région des îles Discovery pendant leur migration au moment où au moins une ferme d'élevage de saumon atlantique est contaminée par *A. salmonicida* ou présente des signes cliniques de furunculose.

Nous avons comparé les distributions de fréquences des sommes ainsi obtenues aux résultats du processus binomial (Tableau 24). Les deux méthodes ont donné des résultats très proches, ce qui confirme qu'elles sont fiables pour estimer l'exposition potentielle des saumons rouges du fleuve Fraser sur huit ans. Au fur et à mesure que le nombre d'itérations augmentait (p. ex. de 1 000 à 10 000), la distribution résultant de la méthode bootstrap ressemblait à la distribution binomiale (voir des exemples dans le Tableau 24).

Tableau 24. Comparaison des estimations de l'exposition d'après le processus binomial et la stratégie d'auto-amorçage (1 000 et 10 000 itérations). Chaque pourcentage représente la probabilité d'exposition de saumons rouges juvéniles ou adultes du fleuve Fraser sur au moins un nombre donné d'années (sur huit).

Années avec infection	Méthode	Juvéniles ou adultes (%)
Au moins trois	Processus binomial	~17
	Bootstrap (1 000)	~16
	Bootstrap (10 000)	~17
Au moins six	Processus binomial	~0
	Bootstrap (1 000)	~0
	Bootstrap (10 000)	~0

9.7 ANNEXE G : MODÉLISATION DE LA PROPAGATION DE L'INFECTION PAR *AEROMONAS SALMONICIDA* CHEZ LE SAUMON ROUGE SAUVAGE DU FLEUVE FRASER

Nous avons construit un modèle stochastique, fréquence-dépendant, compartimenté et susceptible-exposé-infectieux-guéri (SEIR), avec mortalité due à la maladie (Figure 9) afin d'explorer les conditions dans lesquelles *A. salmonicida* pourrait se propager dans la population sauvage de saumon rouge adulte. Nous avons choisi un modèle fréquence-dépendant, car il représente mieux le comportement des poissons se rassemblant en bancs qu'un modèle densité-dépendant. Dans un modèle fréquence-dépendant, le nombre de contacts est indépendant de l'effectif de la population, c'est-à-dire que lorsque l'effectif de la population diminue (principalement en raison de la mortalité due à la maladie), la population occupe effectivement une zone plus petite et un poisson individuel n'est donc pas en contact plus étroit avec son voisin le plus proche dans un grand banc que dans un petit banc. Toutefois, cela ne signifie pas que la densité n'a pas d'influence sur la dynamique de la transmission d'*A. salmonicida* (Boily *et al.*, 2019).

Le modèle classe les hôtes de la population dans l'un des cinq compartiments suivants : sensibles (s'ils ne sont pas immunisés ou n'ont pas été exposés auparavant à *A. salmonicida*), exposés (s'ils sont contaminés mais pas encore infectieux), infectés (s'ils sont contaminés et capables de transmettre l'agent pathogène à des hôtes sensibles) et guéris (s'ils ont réussi à éliminer l'infection et à acquérir une immunité). Il y a deux compartiments « infectés » : Y_1 et Y_2 . Les individus des deux compartiments sont capables de transmettre l'agent pathogène à des hôtes sensibles, mais la guérison et la mortalité due à la maladie ne peuvent se produire qu'à partir du compartiment Y_2 .

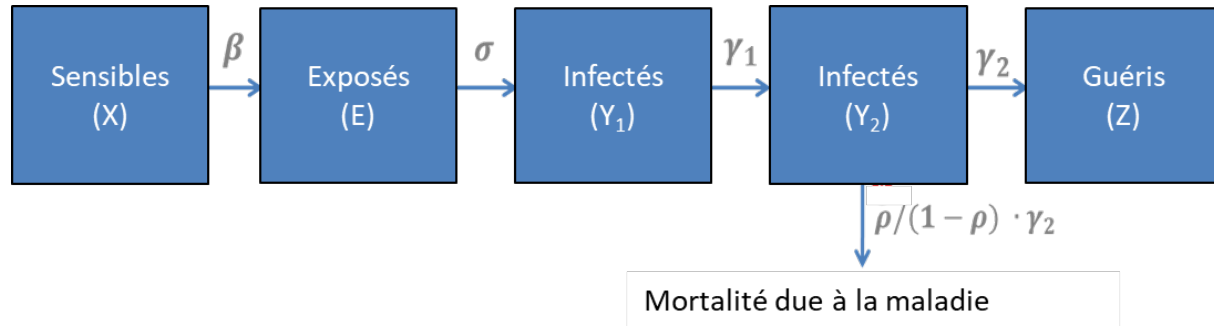


Figure 9. Modèle compartimenté, fréquence-dépendant, SEIR (Susceptible-Exposé-Infectieux-Rétablis) avec mortalité due à la maladie.

Où X , E , Y et Z sont respectivement le nombre de poissons sensibles, exposés, infectés et guéris, β est le paramètre de transmission, σ est le taux de transition de l'exposition à l'infection ($1/\sigma$ est la durée moyenne de la période de latence), γ est le taux de guérison et ρ est la probabilité de mourir de l'infection avant la guérison. Le nombre total de poissons dans la population, N , est exprimé comme suit :

$$N = X + E + Y_1 + Y_2 + Z \quad (1)$$

Le paramètre de transmission β peut être exprimé sous la forme :

$$\beta = R_0 \cdot \gamma \quad (2)$$

où R_0 est le taux de reproduction de base et $1 / \gamma$ est la durée moyenne de la période de contamination.

Les poissons passent du compartiment « infectés » Y_1 au compartiment « infectés » Y_2 au taux de γ_1 , et guérissent de l'infection au taux de γ_2 . La durée moyenne de la période infectieuse est représentée par :

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{1}{\gamma_1} + \frac{1}{\gamma_2} \quad (3)$$

La durée moyenne entre l'exposition et le début de la mortalité due à la maladie, Φ , peut être exprimée comme suit :

$$\Phi = \frac{1}{\sigma} + \frac{1}{\gamma_1} \quad (4)$$

Le modèle mathématique peut être décrit par les équations (5) à (9) ci-après, adaptées des sections 2.2., 2.5 et 3.3 de Keeling et Rohani (2007).

L'équation (5) représente la variation du nombre d'individus sensibles, à mesure que les poissons sont retirés du compartiment « sensibles » pour entrer dans le compartiment « exposés ». Elle dépend du paramètre de transmission β , ainsi que de la proportion d'individus infectieux dans la population.

$$\frac{dX}{dt} = -\beta \cdot X \cdot \frac{(Y_1 + Y_2)}{N} \quad (5)$$

Le premier terme de l'équation (6) représente les poissons qui entrent dans le compartiment « exposés » depuis le compartiment « sensibles », et le deuxième représente les poissons qui sont retirés du compartiment « exposés » pour entrer dans le premier compartiment « infectés » Y_1 . Le paramètre de transmission peut être exprimé sous la forme :

$$\frac{dE}{dt} = \beta \cdot X \cdot \frac{(Y_1 + Y_2)}{N} - \sigma \cdot E \quad (6)$$

Le premier terme de l'équation (7) représente les poissons qui entrent dans le compartiment « infectés » depuis le compartiment « exposés », et le deuxième représente les poissons qui sont retirés du premier compartiment « infectés » pour entrer dans le second compartiment « infectés » Y_2 . Cette transition dépend de la durée moyenne de la période infectieuse et de la durée moyenne entre l'exposition et le début de la mortalité due à la maladie.

$$\frac{dY_1}{dt} = \sigma \cdot E - \gamma_1 \cdot Y_1 \quad (7)$$

Le premier terme de l'équation (8) représente les poissons qui entrent dans le second compartiment « infectés » depuis le premier compartiment « infectés », le deuxième représente les poissons qui sont retirés du second compartiment « infectés » pour entrer dans le compartiment « guéris » et le troisième représente les poissons qui meurent de la maladie avant la guérison. Cette transition dépend de la durée moyenne de la période infectieuse, de la durée moyenne entre l'exposition et le début de la mortalité due à la maladie, et de la probabilité de mourir avant la guérison.

$$\frac{dY_2}{dt} = \gamma_1 \cdot Y_1 - \gamma_2 \cdot Y_2 - \frac{\rho}{(1 - \rho)} \cdot \gamma_2 \cdot Y_2 \quad (8)$$

L'équation (9) représente les poissons qui entrent dans le compartiment « guéris » à partir du second compartiment « infectés ». Cette transition dépend de la durée moyenne de la période infectieuse et de la durée moyenne entre l'exposition et le début de la mortalité due à la maladie.

$$\frac{dZ}{dt} = \gamma_2 \cdot Y_2 \quad (9)$$

Nous avons réalisé des simulations stochastiques à l'aide de l'algorithme τ -leap avec un pas de temps journalier fixe (Gillespie et Petzold, 2003; Keeling et Rohani, 2007). Tous les modèles, analyses et simulations ont été exécutés à l'aide de la version R 3.5.1 (R Core Team, 2018), en utilisant le progiciel ggplot2 pour les représentations graphiques (Wickham *et al.*, 2018).

Comme les paramètres requis dans le modèle sont inconnus pour le saumon rouge sauvage, nous avons formulé des hypothèses et comparé différentes combinaisons de paramètres du modèle. Mille itérations ont été exécutées pour chaque combinaison.

Les hypothèses utilisées dans ce modèle sont les suivantes :

- Tous les saumons rouges adultes en montaison migrent en même temps.
- Tous les poissons ont la même probabilité de contact entre eux.
- Les poissons morts ne sont pas une source de l'agent pathogène infectieux.
- Il n'y a pas d'accumulation locale d'agents pathogènes dans l'eau.
- La mortalité naturelle n'est pas représentée dans le modèle.
- Au départ, tous les poissons sont entièrement sensibles à l'infection par *A. salmonicida*.
- Les poissons guéris ont une immunité à vie.
- Un seul poisson contaminé est introduit dans une population d'un million de poissons au jour 0.

Les paramètres du modèle SEIR reposaient sur des expériences en laboratoire menées avec des alevins de saumon chinook exposés à *A. salmonicida* par cohabitation dans l'eau douce (Ogut, 2001; Ogut et Reno, 2004; Ogut *et al.*, 2004; Ogut *et al.*, 2005; Ogut et Reno, 2005).

Dans le premier scénario, nous avons utilisé la combinaison de paramètres suivante : $R_0 = 3,25$ pour des saumons de 1,97 g dans l'eau douce à une densité de 5 700 poissons/m³ (Ogut *et al.*, 2004); $\rho = 64 \%$ (selon le taux de mortalité des individus contaminés 10 jours après l'exposition dans Ogut *et al.* (2004)), durée moyenne de la période de latence $1 / \sigma = 3$ jours (Ogut, 2001), durée totale moyenne de la période infectieuse $1 / \gamma = 14$ jours (Enger *et al.*, 1992) et durée moyenne de la période entre l'exposition et la mortalité due à la maladie $\Phi = 9$ jours [estimée à partir des données dans Ogut *et al.* (2004)].

La Figure 10 montre que dans ces conditions, la mortalité due à la maladie commence à augmenter lentement autour de 70 jours après l'exposition (jae) et passe à 1 % de la population en moyenne à 120 jae (minimum = 94 jae). Nous avons comparé cette durée à celle nécessaire aux saumons rouges adultes du fleuve Fraser pour atteindre leurs frayères après leur passage dans la région des îles Discovery et leur entrée dans le fleuve Fraser. La plupart des poissons ont besoin d'environ 35 jours, après quoi ils frayent et meurent. Par conséquent, les poissons

devraient mourir de causes naturelles avant que l'agent pathogène ne puisse se propager suffisamment dans la population pour provoquer une mortalité importante au niveau de la population. En outre, lorsque le nombre d'individus initialement contaminés est faible, comme c'est le cas ici, une extinction de l'épidémie avant la phase logarithmique de croissance est possible, en raison de la stochasticité du processus (Allen *et al.*, 2017). Dans les conditions modélisées, dans 32 % des 1 000 itérations du modèle, il n'y a pas eu de propagation significative de l'infection, c'est-à-dire une mortalité cumulée de moins de 1 % sur 365 jours.

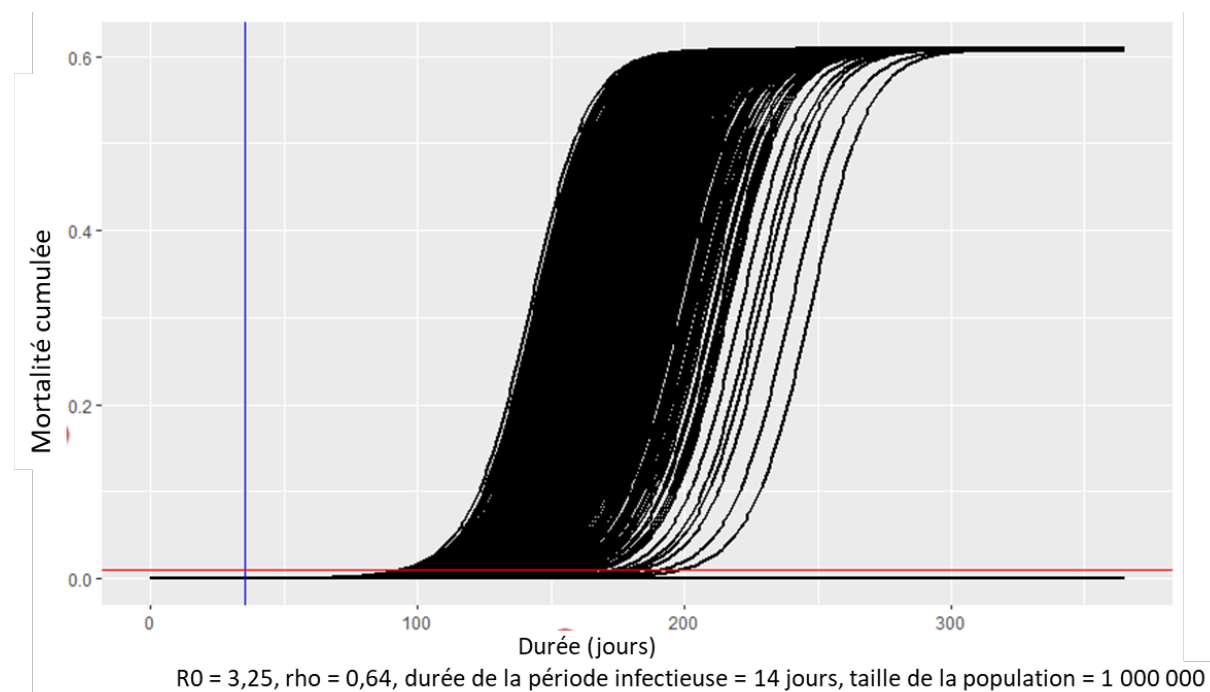


Figure 10. Mortalité cumulée résultant de la propagation simulée de la bactérie *Aeromonas salmonicida* dans la population adulte de saumon rouge en montaison. Le modèle a été exécuté avec 1 000 itérations et un seul poisson infecté a été introduit dans une population d'un million de poissons au jour 0. La ligne bleue indique le moment où la plupart des adultes en montaison auront atteint leurs frayères et seront morts. La ligne rouge représente 1 % de la mortalité cumulée.

En utilisant les mêmes paramètres que ci-dessus, il a été déterminé qu'il faudrait que $R_0 \geq 12$ pour qu'une proportion significative de la population (1 %) meure dans les 35 jours suivant l'exposition. Même en donnant à d'autres paramètres des valeurs parfois irréalistes, il n'a pas été possible d'atteindre 1 % de mortalité cumulée dans les 35 jours avec des valeurs de $R_0 \leq 7$. Il est extrêmement peu probable que le taux de reproduction de base de la bactérie *A. salmonicida* soit aussi élevé chez le saumon sauvage. En effet, il est généralement admis que les maladies dont le taux de reproduction de base est égal ou supérieur à 5 sont très contagieuses : dans une population bien mélangée et entièrement sensible, presque tous les individus la contracteront probablement (Keeling et Rohani, 2007). À titre d'exemple, le taux de reproduction de base de la fièvre aphteuse, qui est souvent considérée comme la maladie la plus contagieuse du bétail, a été estimé à 3,5 - 4,5 lors de l'épizootie de 2001 en Grande-Bretagne (Ferguson *et al.*, 2001).

En reprenant les mêmes paramètres que ci-dessus, nous avons aussi étudié le nombre de poissons initialement contaminés qui serait nécessaire pour qu'une proportion significative (1 %) de la population meure dans les 35 jours suivant l'exposition. À $R_0 = 3.25$, il faudrait mille poissons initialement contaminés; à $R_0 = 5$, quatre cents poissons initialement contaminés; et à

$R_0 = 8$, il faudrait environ 50 poissons initialement contaminés. Toutefois, compte tenu des conclusions de l'évaluation de l'infection et de la discussion sur le taux de reproduction de base dans le paragraphe ci-dessus, il est extrêmement peu probable que ces conditions soient présentes.