

**CODE DE PRATIQUES POUR LE SOIN ET LA
MANIPULATION DES SALMONIDÉS D'ÉLEVAGE : REVUE
DE LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE RELATIVE AUX
QUESTIONS DE BIEN-ÊTRE PRIORITAIRES**

Septembre 2020

Comité scientifique du code de pratiques pour les salmonidés d'élevage

Richard D. Moccia, M.Sc. (coprésident)

Professeur

Département des sciences animales

Centre d'aquaculture

Université de Guelph

David Scarfe, Ph.D., D.M.V., MRSSAf, Cert.Aq.V. (coprésident)

Professeur extraordinaire

Faculté des sciences vétérinaires

Université de Pretoria

et

Aquatic Veterinary Associates International, LLC

James Duston, Ph.D.

Professeur

Département de sciences animales et d'aquaculture

Université Dalhousie

E. Don Stevens, Ph.D.

Professeur auxiliaire

Département des sciences biomédicales

Université de l'Île-du-Prince-Édouard

J. Michelle Lavery, M.Sc.

Doctorante

Département de biologie intégrative

Université de Guelph

Barry Milligan, M.Sc., D.M.V. (ès qualités)

Président du Comité d'élaboration du Code de pratiques

Alliance de l'industrie canadienne l'aquaculture



REMERCIEMENTS

Le travail considérable mené pour la réalisation du présent rapport a bénéficié de la participation et des avis de plusieurs contributeurs. Le Comité scientifique remercie le Dr Barry Milligan (président du Comité du code) pour son expertise inestimable tout au long de la préparation du rapport et Caroline Ramsay (gestionnaire du Code) pour son soutien constant. Le Comité remercie aussi Mark Fast (professeur agrégé, Université de l'Île-du-Prince-Édouard) pour sa contribution importante en tant que coauteur de la troisième partie, *Pou du poisson : infection et traitement*. Le Comité est également reconnaissant aux trois évaluateurs anonymes dont les commentaires ont grandement amélioré la qualité du rapport et à la Dre Patricia V. Turner (professeure émérite, Université de Guelph) qui a coordonné l'évaluation par les pairs.

Le financement du projet est assuré par le programme Agri-assurance dans le cadre du Partenariat canadien pour l'agriculture, une initiative fédérale-provinciale-territoriale.

Extrait du mandat du comité scientifique

Contexte

Il est largement accepté que les codes, les lignes directrices, les normes et la législation au sujet du bien-être animal doivent s'appuyer sur les connaissances les plus à jour qui existent. Ce savoir provient souvent de la littérature scientifique.

En réinstaurant un processus d'élaboration des codes de pratiques, le CNSAE reconnaît la nécessité de mettre en place des moyens plus officiels pour intégrer la participation scientifique au processus d'élaboration des codes de pratiques. L'examen par le Comité scientifique des questions de bien-être animal prioritaires pour l'espèce à l'étude fournit de l'information très utile au Comité d'élaboration du code pour élaborer ou réviser un code de pratiques. Le fait que le rapport du Comité scientifique est accessible au public rehausse la transparence et la crédibilité du code.

Le CNSAE crée un Comité scientifique pour chaque code de pratiques en cours d'élaboration ou de révision. Ce comité est composé d'un nombre cible de 6 spécialistes de la recherche sur les soins et la gestion des animaux à l'étude. Le CNSAE sollicite des mises en candidature de la part : 1) de l'Association canadienne des médecins vétérinaires, 2) de la Société canadienne de science animale, et 3) de la section canadienne de la Société internationale d'éthologie appliquée. Au moins un représentant de chacun de ces organismes scientifiques professionnels est nommé au Comité scientifique. D'autres organismes scientifiques professionnels peuvent aussi siéger au Comité scientifique au besoin.

Objectifs et buts

Le Comité scientifique rédige un rapport qui fait la synthèse de tous les résultats de la recherche portant sur les questions de bien-être animal essentielles, telles que déterminées par le Comité scientifique et par le Comité d'élaboration du code. Ce dernier se sert du rapport en question lors de la rédaction du code de pratiques pour l'espèce visée.

Le rapport du Comité scientifique ne contient pas de recommandations découlant des résultats de recherche. Il vise à présenter une compilation non biaisée des constatations scientifiques.

Le mandat intégral du Comité scientifique, qui s'inscrit dans le Processus d'élaboration des codes de pratiques applicables aux soins et à la manipulation des animaux d'élevage du CNSAE, est disponible sur le site www.nfacc.ca/processus-delaboration-des-codes#appendixC.

CODE DE PRATIQUES POUR LE SOIN ET LA MANIPULATION DES SALMONIDÉS D'ÉLEVAGE : REVUE DE LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE RELATIVE AUX QUESTIONS DE BIEN-ÊTRE PRIORITAIRES

Rapport du Comité scientifique du Code de pratiques pour les salmonidés d'élevage

Septembre 2020

TABLE DES MATIÈRES

1	Sensibilité des poissons : pourquoi est-ce une question importante?	1
1.1	Introduction.....	1
1.1.1	Autres esprits	2
1.2	Pertinence du concept de sensibilité pour le bien-être.....	2
1.3	État de la littérature.....	3
1.3.1	Nociception.....	3
1.3.2	Les arguments contre la sensibilité des poissons.....	3
1.3.3	Arguments en faveur de la sensibilité des poissons.....	4
1.3.4	Considérations théoriques.....	5
1.4	Que faire?.....	5
1.4.1	L'énigme.....	5
1.4.2	Principe de précaution.....	6
1.5	Position du Comité scientifique.....	7
1.6	Références.....	7
2	Indicateurs de stress	12
2.1	Introduction.....	12
2.2	La réponse au stress	12
2.3	Catégories d'indicateurs de stress.....	13
2.4	Procédures stressantes.....	14
2.4.1	Stress pendant le transport	14
2.4.2	Stress pendant le classement.....	14
2.5	Indicateurs de stress	15
2.5.1	Changements morphologiques.....	15
2.5.2	Changements comportementaux.....	15
2.6	Mises en garde	17
2.7	Références.....	17
	Figure 2.1 Réponses primaire, secondaire et tertiaire du poisson en cas de détresse.....	22
3	Pou du poisson : infection et traitement	23
3.1	Introduction.....	24
3.2	Biologie et cycle biologique du pou du poisson	24
3.3	Effets du pou du poisson.....	25

3.4	Surveillance, contrôle et traitement des infections par le pou du poisson	25
3.4.1	Surveiller les infections par le pou du poisson	25
3.4.2	Traitement chimique contre le pou du poisson	27
3.4.3	Méthodes d'épouillage et barrières mécaniques anti-poux du poisson	28
3.4.4	Lutte biologique au moyen de poissons nettoyeurs	29
3.4.5	Méthodes différentes et nouvelles de lutte contre le pou du poisson	30
3.5	Références	31
	Figure 3.1. Cycle biologique de <i>L. salmonis</i> , une espèce commune de pou du poisson infectant le saumon.	39

4	Privation de nourriture	40
4.1	Introduction	40
4.2	Aliments, réserves énergétiques, stress causé par l'inanition et réponses comportementales	41
4.3	Pratiques aquacoles étendant la privation de nourriture à d'autres domaines que l'évacuation intestinale	44
4.3.1	Privation de nourriture avant l'abattage	44
4.3.2	Proliférations chroniques d'algues nocives	44
4.3.3	Gestion des risques de surrefroidissement	45
4.3.4	Maturation sexuelle	45
4.3.5	Température de l'eau élevée	45
4.4	Références	46

Tableau 4.1 Taux d'évacuation intestinale (en heures) du saumon de l'Atlantique, de la truite brune et de la truite arc-en-ciel nourris de différents aliments.

Figure 4.1 Temps d'évacuation intestinale (en heures) de la truite arc-en-ciel par rapport au poids corporel (10-500 g) et la température (5-20 °C).

5	Densité biologique	52
5.1	Introduction	52
5.2	Considérations relatives à la taille des bassins et des filets	53
5.3	Effets sur la santé des poissons	53
5.3.1	Mortalité et réponse au stress	53
5.3.2	Fonction immunitaire et maladies	55
5.3.3	Croissance et alimentation	56
5.3.4	État des nageoires et autres indices de santé	57
5.4	Effets sur le comportement du poisson et bien-être global	58
5.4.1	Répartition spatiale	58
5.4.2	Interactions entre conspécifiques	58
5.4.3	Bien-être global	60
5.5	Situations d'élevage aux densités biologiques élevées	61
5.6	Références	61

Tableau 5.1 Résumé des tendances générales de différents paramètres pertinents en matière de bien-être pour plusieurs espèces de salmonidés.

6	Qualité de l'eau dans les systèmes d'aquaculture en recirculation (SAR)	69
6.1	Introduction	69

6.2	Température	70
6.3	Oxygène dissous (O.D.).....	71
6.4	Dioxyde de carbone	72
6.5	Matières solides, coloration de l'eau et ozone	74
6.6	Ammoniac, nitrite et nitrate	75
6.7	Gestion de l'écosystème microbien	75
6.8	Références.....	76
7	Éclairage.....	81
7.1	Vue d'ensemble	81
7.2	Incubation des œufs et alevins	82
7.3	Alevins nageants, alevins commençant à se nourrir et tacons	82
7.4	Smoltification.....	83
7.5	Cages marines (phase marine)	84
7.5.1	Empêcher la maturation sexuelle	84
7.5.2	Éviter les poux du poisson	85
7.6	Manipuler le moment de la reproduction par les photopériodes.....	85
7.7	Références.....	86
	Tableau 7.1 Résumé des conditions d'intensité et de durée de la lumière blanche convenant au saumon de l'Atlantique (<i>Salmo salar</i>) à chaque stade de production.	91
8	Poissons non reproducteurs, reproduction induite et modification génétique	92
8.1	Introduction.....	92
8.2	Stock de géniteurs	92
8.3	Triploïdie et préoccupations relatives au bien-être	94
8.4	Population monosexue	96
8.5	Utilisation d'hormones.....	96
8.6	Modification génétique	97
8.7	Références.....	97
9	Abattage dans un coulis de glace.....	102
9.1	Introduction.....	102
9.2	Le refroidissement de poissons vivants est-il léthal pour les salmonidés?.....	103
9.3	Effets du refroidissement rapide sur le cerveau, les nerfs et les muscles des salmonidés	104
9.3.1	Absence de nocicepteurs sensibles au froid.....	104
9.3.2	Récepteurs thermiques du cerveau.....	104
9.3.3	Effets du refroidissement sur les fonctions cérébrales.....	104
9.3.4	Effets du refroidissement abrupt sur la fonction musculaire	105
9.4	Facteurs de stress pendant l'abattage dans un coulis de glace.....	105
9.5	Abattage dans un coulis de glace avec ajout de CO ₂	106
9.6	Références.....	107
	Tableau 9.1. Températures létales inférieures pour les salmonidés.....	110

1 Sensibilité des poissons : pourquoi est-ce une question importante?

Conclusions :

- 1. Les définitions de « sensibilité » et de « conscience » varient considérablement selon les disciplines et au sein de certaines d'entre elles, notamment la neuroscience, la psychologie et la philosophie. De plus, le « problème des autres esprits » empêche de montrer de manière concluante l'existence de la sensibilité. C'est pourquoi il est très difficile de débattre de cette question en s'appuyant sur des preuves solides et concluantes.**
- 2. La nociception, qui ne suppose pas l'aspect émotionnel et subjectif de la douleur, déclenche une des réponses physiologiques et comportementales très variées chez tous les vertébrés, qu'on appelle réponse nocifensive.**
- 3. Les arguments selon lesquels les poissons ne sentiraient pas la douleur reposent majoritairement sur les conditions neurologiques de la sensibilité chez les êtres humains et leur absence chez les poissons.**
- 4. Les arguments selon lesquels les poissons sentiraient la douleur reposent majoritairement sur l'expression de réponses similaires à la douleur aux stimulus nocifs et des réponses comportementales variables laissant supposer la présence d'états affectifs conscients.**
- 5. Les études scientifiques publiées à ce jour et le problème philosophique persistant des autres esprits ne nous permettent pas de savoir si les poissons sont des êtres sensibles. Nous savons en revanche que les poissons expriment de façon constante des réponses similaires à la douleur aux stimulus nocifs. C'est pourquoi en raison des conséquences morales qu'aurait le fait de supposer qu'ils ne sont pas sensibles, le Comité scientifique conclut qu'il est préférable d'adopter une approche prudente, selon laquelle les producteurs emploient, dans la mesure du possible, des mesures d'atténuation des réponses au stress nocifensives et maladaptatives susceptibles de causer une douleur consciente ou des états affectifs négatifs.**

1.1 Introduction

La question de savoir si les poissons sont doués de sensibilité est sujette à débat et elle s'est cristallisée autour de leur perception ou leur absence de perception de la douleur. Le sujet est non seulement extrêmement complexe, mais aussi controversé et clivant. La difficulté à synthétiser les preuves dans un sens ou dans l'autre émane principalement de la nature interdisciplinaire du débat. En effet, la littérature s'étend sur plusieurs domaines comme la neurophysiologie, la psychologie, l'éthologie, la philosophie ou la science du bien-être animal, qui ont chacun leurs approches et leur langage. Dans le présent chapitre, nous nous appliquerons à (1) résumer de manière brève et critique les arguments pertinents pour et contre le fait que les poissons sont des êtres sensibles, principalement dans le cadre du débat sur la douleur des poissons et (2) décrire et expliquer la position du Comité scientifique relative au bien-être des poissons.

Toutefois, avant d'entrer dans le débat sur les poissons, il convient d'examiner les principaux termes et concepts. On peut définir la sensibilité comme étant « la conscience phénoménale » (Allen et Trestman, 2017), un type de conscience d'abord distingué par Block (1995) qui évoque le caractère qualitatif d'une expérience ou « ce à quoi ressemble » le fait d'être dans un état donné (Nagel, 1974). En science et en éthique du bien-être animal, le terme « sensibilité » est généralement restreint pour englober particulièrement les expériences subjectives et affectives (par exemple Singer, 1975; Varner, 2012). En pratique, être sensible signifie ressentir et non pas seulement sentir inconsciemment ou par réflexe ni répondre à un stimulus. En général, on considère que ressentir implique un influx sensoriel, des variables intermédiaires de l'émotion et de la motivation qui contribuent à l'interprétation des informations sensorielles et un résultat comportemental (par exemple Brown et Farber, 1951; Berridge, 1996; Mason et Bateson, 2009; Cabanac et coll., 2009). La sensibilité n'existe pas sans ces variables intermédiaires. Prenons l'exemple d'un être humain qui sentirait la chaleur d'une cuisinière sur la main (influx sensoriel), ressentirait de la douleur (émotion) et souhaiterait l'éviter (motivation), puis mettrait la main brûlée dans du lait pour la calmer (résultat comportemental). En revanche, un robot pourrait être programmé pour sentir la température d'une cuisinière (influx sensoriel) et mettre son capteur de température dans du lait après un certain seuil (résultat comportemental), mais le résultat comportemental ne résulterait pas d'une émotion ou motivation intermédiaires.

1.1.1 Autres esprits

Quand on cherche à étudier ces variables intermédiaires de l'émotion et de la motivation, on se heurte à une difficulté, à savoir qu'elles sont propres à l'être qui les ressent et qu'il est le seul à en connaître l'expérience. Le problème, souvent dit « problème des autres esprits », est synthétisé par Avramides (2001), qui observe qu'en grande partie, notre compréhension de la sensibilité, de la conscience et de ce qu'est un « esprit » provient de notre expérience de l'existence de notre esprit. Essentiellement, nous ne pouvons pas savoir si autrui est sensible. Pourtant, nous supposons couramment que les autres êtres humains sont sensibles, principalement en raison de l'homologie anatomique entre notre système nerveux (qui probablement produit notre sensibilité) et celui des autres humains, et en raison de notre capacité à communiquer nos expériences émotionnelles personnelles les uns aux autres. On suppose aussi que la plupart des espèces de mammifères non humains possédant un système nerveux similaire à celui des humains sont douées de sensibilité, malgré notre incapacité à communiquer avec eux. Il est toutefois plus complexe de le supposer pour les lignées n'ayant pas autant de caractéristiques neurologiques similaires à celles de l'humain, comme les oiseaux et les poissons (par exemple Bateson, 1991; Nieuwenhuys, 2009), parce que les suppositions fondées sur une homologie anatomique sont moins étayées et que, comme les mammifères non humains, les oiseaux et les poissons ne peuvent pas rapporter leurs expériences.

1.2 Pertinence du concept de sensibilité pour le bien-être

La capacité à ressentir la douleur, la souffrance ou tout autre état affectif négatif répréhensible (c'est-à-dire le fait d'être doué de sensibilité) est considérée par de nombreux scientifiques et éthiciens du bien-être comme une justification du droit d'un animal à ce que son bien-être soit pris en compte (par exemple Duncan, 1993). Le Conseil national pour les soins aux animaux d'élevage (CNSAE) donne une définition du bien-être qui inclut les états affectifs, ainsi que la santé et le fonctionnement biologique et l'expression de comportements normaux et importants.

Cette définition reflète l'approche des « trois cercles du bien-être » de Fraser (2008), qui postule que le bien-être comprend trois concepts qui se chevauchent : (1) la santé et le fonctionnement biologique, (2) les états affectifs et (3) la vie naturelle. Par conséquent, il est important de déterminer si les poissons possèdent la capacité d'avoir des états affectifs conscients (c'est-à-dire s'ils sont doués de sensibilité). Il est nécessaire d'expliquer la position du Comité scientifique sur l'état de la littérature et sur la manière de considérer le bien-être des poissons afin de placer le reste du rapport dans son contexte.

1.3 État de la littérature

1.3.1 Nociception

Tous s'accordent pour dire que les poissons possèdent les éléments neuronaux de la nociception (réponse réflexe à des stimulus nocifs) et sentent différents types de stimulus. Ils ont des nocicepteurs et intègrent les influx sensoriels à partir de plusieurs organes sensoriels. Les nocicepteurs des poissons ressemblent à ceux d'autres vertébrés, hormis le fait que la nociception au froid n'a pas été démontrée chez les poissons (Ashley et coll., 2007). Il est important de noter que la nociception n'est pas une perception de la douleur et que, par conséquent, elle ne peut être une preuve de la sensibilité. Il s'agit plutôt d'un processus entièrement inconscient qui détermine la possibilité d'atteinte du tissu ou une atteinte du tissu avant de produire une réponse nocifensive.

1.3.2 Les arguments contre la sensibilité des poissons

Les scientifiques mettant en doute le fait que les poissons sentent la douleur (arguments principalement donnés par Rose et coll., 2014 et Key, 2016) s'appuient surtout sur l'idée que le néocortex, qui serait nécessaire selon eux à la conscience humaine, est absent dans le cerveau des téléostéens. Leur argument – selon lequel toute sensibilité est impossible en l'absence de néocortex (qui facilite la transmission d'informations par un réseau pour produire de la conscience) – est nécessairement anthropocentrique. Étant donné que les êtres humains peuvent rapporter leurs expériences et qu'ils sont supposés sensibles de manière convaincante (voir *Partie 1.1.1 : Autres esprits*), la plupart des recherches supposent que les structures nécessaires pour produire de la sensibilité chez l'humain sont les seules en mesure de produire de la sensibilité.

Cet argument est d'autant plus délicat que nos connaissances sur le fonctionnement du cerveau des poissons sont limitées. Briscoe et Ragsdale (2019) affirment que « les relations évolutionnistes des structures semblables au télencéphale entre les mammifères et les poissons à nageoires rayonnées ne sont pas résolues. Une étude de cas l'illustre : elle se pose la question de savoir si les poissons à nageoires rayonnées possèdent un homologue de l'hippocampe, une structure du télencéphale dorsal (ou pallium). Les chercheurs ont avancé différentes propositions : que tout le pallium des poissons était l'homologue de l'hippocampe, que les poissons n'avaient pas d'homologue de l'hippocampe, ou que l'hippocampe des poissons se trouvait dans le pallium médial ou latéral. Cet exemple saisit l'essence du chaos des homologies contradictoires du télencéphale proposées tout au long de l'histoire de la neuroanatomie comparative ». Toutefois, des travaux pratiques novateurs ont été réalisés : après avoir pratiqué des lésions sur des régions de cerveau de téléostéens, les chercheurs réalisaient des essais sur plusieurs paradigmes comportementaux des sujets (travaux examinés dans Broglio et coll., 2005

et Demski, 2013). Il reste que notre compréhension des relations entre régions et de leurs répertoires de fonctions est bien moindre que celle de la neuroanatomie et des fonctions des mammifères.

1.3.3 Arguments en faveur de la sensibilité des poissons

La controverse portant sur la sensibilité ou la « sensation » et l'expérience de la douleur chez les poissons est minutieusement examinée dans l'ouvrage de Braithwaite (2010), qui appuie l'idée que les poissons ressentent consciemment la douleur. La majorité des arguments selon lesquels les poissons sont doués de sensibilité reposent sur des expériences comportementales, par lesquelles des chercheurs et des chercheuses avancent que les poissons utiliseraient un ensemble de structures neuroanatomiques différent de celui des mammifères pour produire une douleur consciente et qu'ils montrent une capacité de cognition complexe suffisante pour étayer l'idée qu'ils seraient dotés de conscience (par exemple Chandroo et coll., 2004 et *partie 1.3.4 : Considérations théoriques*). À titre d'exemple, la truite arc-en-ciel répond aux stimulus nocifs (une injection d'acide acétique dans les lèvres) par différentes modifications de comportement, comme l'augmentation de la fréquence des mouvements operculaires et un balancement ou le frottement de la bouche sur les parois du bassin (Sneddon, 2003). L'attention que porte la truite aux objets nouveaux est également modifiée quand elle est soumise à des injections nocives (Sneddon et coll., 2003). Enfin, l'administration de morphine réduit ces modifications de comportement et diminue la fréquence operculaire (Sneddon, 2003). Les auteurs et d'autres chercheurs en ont déduit que ces changements comportementaux prouvaient la perception consciente de la douleur (soit la sensibilité). Bien que ces études fondatrices aient été critiquées pour des questions méthodologiques (par exemple sur les doses d'analgésique, voir Newby et Stevens, 2008) et parce qu'elles supposaient que les réponses plus complexes que de simples réflexes impliquaient nécessairement une conscience quand ce n'est pas le cas (voir Rose et coll., 2014 et le paragraphe suivant), d'autres travaux sur ce champ ont été réalisés. Ils ont observé des réponses similaires à la douleur sur de nombreuses espèces de poisson dans des paradigmes expérimentaux divers (travaux examinés dans Schroeder, 2018 et Sneddon, 2019). Ces types de réponses sont généralement considérés comme des preuves de la sensibilité chez les espèces mammaliennes (voir par exemple le tableau 1 dans Brown et Dorey, 2019). Il existe cependant d'autres explications aux réponses exprimées par les poissons exposés à des stimulus nocifs (voir *Partie 1.1.1 : Autres esprits*). Ainsi, la présence de récepteurs aux opioïdes et la réponse à l'administration d'opioïdes ou d'anesthésiques pendant l'exposition à un stimulus nocif se trouvent aussi chez organismes inférieurs comme des invertébrés (par exemple Harrison et coll., 1994) et même des plantes (par exemple Baluška, 2016).

D'autres scientifiques ont utilisé les paradigmes d'apprentissage pour étudier la capacité des poissons à sentir leur environnement (par exemple Popper, 1973), mais la capacité à apprendre et à garder des relations en mémoire n'implique pas nécessairement une capacité de conscience. En effet, des rats ayant subi une transection spinale peuvent apprendre à soulever leurs membres postérieurs pour éviter des stimulus douloureux pendant des durées de plus en plus longues (Grau et coll., 1998) et des rats complètement anesthésiés peuvent apprendre des associations entre des tons et des chocs électriques (Edeline et Neuenschwander-El Massioui, 1988). D'autres se sont appuyés sur des paradigmes d'apprentissage plus complexes (comme le conditionnement de trace classique) en supposant que des résultats positifs indiqueraient un type de mémoire appelé « mémoire déclarative » et impliqueraient une forme de perception

consciente (Nordgreen et coll., 2010), mais cette supposition a été réfutée par plusieurs auteurs (Eichenbaum, 1999; Price, 2015; Perruchet et coll., 2016). D'autres encore ont avancé que des tâches nécessitant de la souplesse dans les réponses (par exemple planification d'itinéraire, compromis selon la motivation) seraient des indications plus convaincantes de la sensibilité des poissons, étant donné qu'on suppose que les états affectifs conscients médient certaines formes de prise de décision souple et des types de recherche d'objectifs nécessitant la capacité d'innover ou de planifier (par exemple Mason, 2011; Droege et Braithwaite, 2015). Certaines espèces de poissons expriment ces types de comportements (études examinées dans Bshary et coll., 2002; Brown et coll., 2006; Brown, 2015; et Droege et Braithwaite, 2015), mais à notre connaissance, aucun exemple d'espèce de salmonidés n'a encore jamais été donné.

1.3.4 *Considérations théoriques*

Nous acceptons l'hypothèse selon laquelle le cerveau est le principal substrat de la sensibilité chez la plupart des espèces de vertébrés. Nous admettons aussi que la conscience nécessite la transmission de signaux nerveux dans des réseaux nerveux complexes (par exemple LeDoux, 2019). Toutefois, en nombre croissant, des scientifiques estiment que la sensibilité et la conscience humaines ne seraient pas aussi étroitement liées au néocortex que ce que supposent Key (2016) et Rose et coll. (2014). Par exemple, certains auteurs (Damasio et Damasio, 2016; Shriver, 2016) montrent que chez les humains, la sensibilité ne dépend pas exclusivement du néocortex et Parvizi et Damasio (2001) soutiennent que des formes simples de conscience peuvent être produites par le tronc cérébral. Cette dernière affirmation est particulièrement intéressante, parce que les cerveaux des poissons téléostéens sont amplement dominés par des régions très développées du tronc cérébral (Nieuwenhuys et coll., 1998), et que de nombreux comportements normalement médiés par le prosencéphale des mammifères sont en fait remarquablement préservés quand le prosencéphale des poissons est retiré (par exemple Overmeier et Hollis, 1983). De plus, d'autres chercheurs soutenant que les poissons sentent la douleur, ou la sentent probablement, déclarent qu'étant donné que les lignées des mammifères et des poissons ont divergé il y a environ 400 millions d'années et que la sensibilité a probablement des avantages adaptatifs (voir Cabanac, 1992; Dawkins, 1990, 1998; Rolls, 2014), une évolution convergente aurait produit quelque chose de similaire à la sensibilité des mammifères dans d'autres lignées au moyen d'autres régions cérébrales ou structures anatomiques (c'est-à-dire autres que celles supposées nécessaires à la sensibilité chez les humains, par exemple Velmans, 2012; Allen, 2013) ou que la conscience daterait d'avant la divergence (ce qui est toutefois particulièrement difficile à étayer scientifiquement). Par ailleurs, Birch (2018) et Varner (2017) supposent l'existence de différents degrés de sensibilité dans les lignées évolutives différentes. Bien que ces considérations puissent reposer sur un fondement théorique solide et remettre en question certains des arguments contre la sensibilité des poissons, elles ne constituent pas des preuves empiriques de la sensibilité des poissons.

1.4 **Que faire?**

1.4.1 *L'énigme*

La sensibilité des poissons implique qu'ils puissent ressentir une gamme d'émotions ayant des conséquences sur leur bien-être (voir *Partie 1.2 : Pertinence du concept de sensibilité pour le bien-être*). Cependant, le problème des autres esprits, nos connaissances insuffisantes sur le cerveau des téléostéens et la difficulté à déterminer les corrélations neurologiques de la

sensibilité font qu'il est extrêmement difficile de prouver de manière concluante la sensibilité des poissons. Néanmoins, l'absence actuelle de preuves ne nie pas la possibilité d'existence de cette sensibilité ni de son éventuelle incidence sur le bien-être (« l'absence de preuve n'est pas une preuve d'absence »). En 2018, 149 418 tonnes de poisson d'élevage étaient produites au Canada, les salmonidés représentant au moins 132 572 tonnes (MPO [Pêches et Océans Canada], 2018). S'il est possible que ces poissons soient des êtres sensibles, les traiter comme s'ils ne l'étaient pas constitue un fardeau moral de souffrance considérable. Que faire alors?

1.4.2 Principe de précaution

Les décideurs politiques se servent du principe de précaution pour réduire les risques, particulièrement lorsqu'on est près du seuil critique où les preuves scientifiques nécessaires à l'appui d'une politique sont incertaines ou incomplètes. Depuis sa première adoption par la Charte mondiale de la nature des Nations unies et son entrée en vigueur internationale dans le Protocole de Montréal relatif aux substances qui appauvrissent la couche d'ozone de 1987, le principe a largement été utilisé par les décideurs. Récemment, Birch (2017) a appliqué le principe au bien-être des poissons dans son Principe de précaution relatif à la sensibilité animale : « Quand il existe des risques de résultats graves et négatifs sur le bien-être animal, l'absence de certitude scientifique totale concernant la sensibilité des animaux en question ne doit pas servir à justifier le report de mesures rentables de prévention de ces résultats ». L'application du principe de précaution qu'il propose a été critiquée (par exemple Woodruff, 2017), mais la prémisse est largement soutenue par des scientifiques et des philosophes qui étudient le bien-être animal (par exemple Kaiser, 2005; Knutsson et Munthe, 2017; Jones, 2016). Ainsi, Lund et coll. (2007) concluent « qu'il faut donner le bénéfice du doute aux poissons d'élevage et que nous devrions nous efforcer de répondre à leur besoin de bien-être le mieux possible ».

Notons toutefois que le principe de précaution a été considérablement critiqué, particulièrement quand il est mis en œuvre en tant que « règle de décision » qui dicte le choix de politiques et de mesures (Ahteensuu et Sandin, 2012). En réponse à une approche de précaution comme règle de décision en matière de sensibilité et de bien-être des poissons, plusieurs ont invoqué « l'approche pragmatique » de Dawkins (2017) (par exemple Arlinghaus et Cooke, 2009; Browman et coll., 2018; Chatigny, 2019), par laquelle elle affirme que « le bien-être animal peut être défini objectivement comme la santé des animaux et ce que les animaux veulent. Cette définition qui ne tient pas compte de la conscience est facilement comprise par des personnes aux points de vue très différents sur les animaux et elle est suffisamment pratique pour indiquer les données scientifiques factuelles nécessaires quel que soit le cas ». Cette définition du bien-être animal porte pourtant à confusion (par exemple comment des animaux sans sensibilité pourraient-ils « vouloir » quoi que ce soit?) et elle est incompatible avec d'autres définitions admises plus généralement (voir *Partie 1.2 : Pertinence du concept de la sensibilité pour le bien-être*). De plus, il existe des exceptions évidentes à cette approche pragmatique, comme l'abattage qui compromet à la fois la santé et la volonté de l'animal, et où pourtant le bien-être est pris en compte.

C'est pourquoi nous proposons une approche de précaution relative à la sensibilité des poissons de forme différente, selon laquelle le choix de mesures et de politiques doit être déterminé dans le respect de certaines conditions générales (Ahteensuu et Sandin, 2012). En pratique, l'approche

de précaution devient alors une sorte de « lentille » à travers laquelle nous pouvons observer et réévaluer des politiques et des pratiques. La formulation précise de cette « approche » de précaution (plutôt que « principe ») admet que (1) la capacité d'application de l'approche par les producteurs peut varier selon les localités et que (2) la rentabilité doit être prise en compte dans l'application de l'approche (Garcia, 1995). Pour ce qui est des étapes de l'approche de précaution, la prise en compte de la sensibilité et du bien-être des poissons oriente les discussions sur les politiques et encourage à la mise en place de mesures limitant les effets affectifs potentiellement négatifs et favorisant les effets potentiellement positifs.

1.5 Position du Comité scientifique

Si nous nous fondons sur l'état des connaissances synthétisé ici et le problème persistant des autres esprits, nous ne savons pas si les poissons sont doués de sensibilité. Nous savons néanmoins que les poissons expriment de façon uniforme des réponses aux stimulus nocifs similaires à la douleur. Étant donné les conséquences morales possibles qu'entraîne le fait de supposer qu'ils ne sont pas sensibles, le Comité scientifique estime qu'il convient d'adopter une approche de précaution prudente, en fonction de laquelle les producteurs emploient des mesures pour atténuer les réponses au stress nocif et maladaptatives susceptibles de causer une douleur consciente ou d'autres états affectifs négatifs (s'ils existent chez les poissons), dans la mesure du possible. À partir de là, les chapitres suivants rapportent des données scientifiques probantes concernant le bien-être des poissons, qui supposent leur capacité à sentir des états affectifs négatifs et positifs.

1.6 Références

- Ahteensuu, M. et P. Sandin (2012). The Precautionary Principle, dans Roeser S., Hillerbrand R., Sandin P., Peterson M. (dir.) *Handbook of Risk Theory*. Springer.
- Allen, C. (2013). Fish cognition and consciousness, *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, vol. 26, p. 25-39.
- Allen, C. et M. Trestman (2017). Animal Consciousness, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, consultable sur <https://plato.stanford.edu/cgi-bin/encyclopedia/archinfo.cgi?entry=consciousness-animal>.
- Arlinghaus, R. et S.J. Cooke (2009). Recreational Fisheries: Socioeconomic Importance, Conservation Issues and Management Challenges, dans Dickson B., Hutton J. et Adams W.M. (dir.). *Recreational Hunting, Conservation and Rural Livelihoods*. Blackwell Publishing Ltd.
- Ashley, P.J., L.U. Sneddon et C.R. McCrohan (2007). Nociception in fish: Stimulus–response properties of receptors on the head of trout *Oncorhynchus mykiss*, *Brain Research*, vol. 1166, p. 47-54.
- Avramides, A. (2001). *Other Minds*, Routledge.
- Baluška, F. (2016). Should fish feel pain? A plant perspective, *Animal Sentience* 2016, vol. 023.
- Bateson, P. (1991). Assessment of pain in animals, *Animal Behaviour*, vol. 42, p. 827-839.
- Berridge, K.C. (1996). Food reward: brain substrates of wanting and liking, *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, vol. 20(1), p. 1-25.

- Birch, J. (2017). Animal sentience and the precautionary principle, *Animal Sentience* 2017, vol. 017.
- Birch, J. (2018). Degrees of sentience?, *Animal Sentience* 2018, vol. 143.
- Block, N. (1995). On a confusion about a function of consciousness, *Behavioural and Brain Sciences*, vol. 18, p. 227-287.
- Braithwaite, V. (2010). *Do Fish Feel Pain?*, Oxford University Press.
- Briscoe, S.D. et C.W. Ragsdale (2019). Evolution of the chordate telencephalon, *Current Biology*, vol. 29(13), p. 647-662.
- Broglio, C., A. Gómez, E. Durán, F.M. Ocaña, F. Jiménez-Moya, F. Rodríguez et C. Salas (2005). Hallmarks of a common forebrain vertebrate plan: specialized pallial areas for spatial, temporal and emotional memory in an actinopterygian fish, *Brain Research Bulletin*, vol. 66, p. 277-281.
- Browman, H.I., S.J. Cooke, I.G. Cowx, S.W.G. Derbyshire, A. Kasumyan, B. Key, J.D. Rose, A. Schwab, A.B. Skiftesvik, E.D. Stevens, C.A. Watson et R. Arlinghaus (2018). Welfare of aquatic animals: Where things are, where they are going, and what it means for research, aquaculture, recreational angling, and commercial fishing, *ICES Journal of Marine Science*, vol. 76(1), p. 82-92.
- Brown, C. (2015). Fish intelligence, sentience and ethics, *Animal Cognition*, vol. 18, p. 1-17.
- Brown, C. et C. Dorey (2019). Pain and emotion in fishes – fish welfare implications for fisheries and aquaculture, *Animal Studies Journal*, vol. 8(2), p. 12.
- Brown, C., K. Laland et J. Krause (dir.) (2006). *Fish Cognition and Behavior*, Blackwell Publishing.
- Brown, J.A. et I.E. Farber (1951). Emotions conceptualized as intervening variables – with suggestions toward a theory of frustration, *Psychological Bulletin*, vol. 48(6), p. 465-495.
- Bshary R., Wickler W. et Fricke H. (2002). Fish cognition: a primate's eye view. *Animal Cognition*, vol. 5:1-13.
- Cabanac, M. (1992). Pleasure: the common currency, *Journal of Theoretical Biology*, vol. 155, p. 173-200.
- Cabanac, M., A.J. Cabanac et A. Parent (2009). The emergence of consciousness in phylogeny, *Behavioural Brain Research*, vol. 198, p. 267-272.
- Chandroo, K.P., I.J.H. Duncan et R. Moccia (2004). Can fish suffer?: Perspectives on sentience, pain, fear and stress, *Applied Animal Behaviour Science*, vol. 86, p. 225-250.
- Chatigny, F. (2019). The controversy on fish pain: A veterinarian's perspective, *Journal of Applied Animal Welfare Science*, vol. 22(4), p. 400-410.
- Damasio, A. et H. Damasio (2016). Pain and other feelings in humans and animals, *Animal Sentience* 2016, vol. 059.

- Dawkins, M.S. (1990). From an animal's point of view: motivation, fitness, and animal welfare, *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 13, p. 1-9.
- Dawkins, M.S. (1998). Evolution and animal welfare, *The Quarterly Review of Biology*, vol. 73(3), p. 305-328.
- Dawkins, M.S. (2017). Welfare with and without consciousness, *Journal of Zoology*, vol. 301(1), p. 1-10.
- Demski, L. (2013). The pallium and mind/behavior relationship in teleost fishes, *Brain, Behavior, and Evolution*, vol. 82, p. 31-44.
- Droege, P. et V.A. Braithwaite (2015). A framework for investigating animal consciousness, *Current Topics in Behavioural Neuroscience*, vol. 19, p. 79-98.
- Duncan, I.J.H. (1993). Welfare is to do with what animals feel, *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, vol. 6 (Suppl. 2), p. 8-14.
- Edeline, J.M. et N. Neuenschwander-El Massioui (1988). Retention of CS-US association learned under ketamine anesthesia, *Brain Research*, vol. 457, p. 274-280.
- Eichenbaum, H. (1999). Conscious awareness, memory and the hippocampus, *Nature Neuroscience*, vol. 2, p. 775-776.
- Fraser, D. (2008). Understanding animal welfare, *Acta Veterinaria Scandinavica* vol. 50 (Suppl. 1), S1.
- Garcia, S.M. (1995). The precautionary approach to fisheries and its implications for fisheries research, technology, and management: an updated review, *FAO Document technique sur les pêches*, vol. 350/2, p. 1-75.
- Grau, J.W., D.G. Barstow et R.L. Joynes (1998). Instrumental learning within the spinal cord: I. Behavioral properties, *Behavioral Neuroscience*, vol. 112(6), p. 1366-1386.
- Harrison, L.M., A.J. Kastin, J.T. Weber, W.A. Banks, D.L. Hurley et J.E. Zadina (1994). The opiate system in invertebrates, *Peptides*, vol. 15(7), p. 1309-1329.
- Jones, R.C. (2016). Fish sentience and the precautionary principle, *Animal Sentience* 2016, vol. 016.
- Kaiser, M. (2005). Assessing ethics and animal welfare in animal biotechnology for farm production, *Scientific and Technical Review of the Office International des Epizooties*, vol. 24(1), p. 75-87.
- Key, B. (2016). Why fish do not feel pain, *Animal Sentience* 2016, vol. 003.
- Knutsson, S. et C. Munthe (2017). A virtue of precaution regarding the moral status of animals with uncertain sentience, *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, vol. 30, p. 213-224.
- LeDoux, J. (2019). *The Deep History of Ourselves: The Four-Billion-Year Story of How We Got Conscious Brains*, Penguin.

Lund, V., C.M. Mejdell, H. Röcklinsberg, R. Anthony et T. Håstein (2007). Expanding the moral circle: Farmed fish as objects of moral concern, *Diseases of Aquatic Organisms*, vol. 75(2), p. 109-118.

Mason, G.J. (2011). Invertebrate welfare: where is the real evidence for conscious affective states?, *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 26(5).

Mason G.J. et M. Bateson (2009). Chapitre 4: Motivation and the organization of behaviour, dans P. Jensen (dir.). *The Ethology of Domestic Animals: An Introductory Text, 2^e edition*, CAB International.

MPO (2018). Production d'aquaculture en quantité et en valeurs, consultable sur <https://www.dfo-mpo.gc.ca/stats/aqua/aqua18-fra.htm>.

Nagel, T. (1974). What is it like to be a bat?, *The Philosophical Review*, vol. 83(4), p. 435-450.

Newby, N.C. et E.D. Stevens (2008). The effects of the acetic acid “pain” test on feeding, swimming, and respiratory responses of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), *Applied Animal Behaviour Science*, vol. 114(1-2), p. 260-269.

Nieuwenhuys, R., H.J. ten Donkelaar et C. Nicholson (1998). *The Central Nervous System of Vertebrates*, Springer.

Nieuwenhuys, R. (2009). The forebrain of actinopterygians revisited, *Brain, Behaviour and Evolution*, vol. 73, p. 229-252.

Nordgreen, J., A.M. Janczak, A.L. Hovland, B. Ranheim et T.E. Horsberg (2010). Trace classical conditioning in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): What do they learn?, *Animal Cognition*, vol. 13(2), p. 303-309.

Overmier, J. B. et K. Hollis (1983). The teleostean telencephalon and learning, dans Davis, R. et G. Northcutt (dir.). *Fish Neurobiology, vol. 2, Higher Brain Functions*, University of Michigan Press.

Parvizi, J. et A. Damasio (2001). Consciousness and the brainstem, *Cognition*, vol. 79, p. 135-159.

Perruchet, P., L. Grégoire, K. Aerts et B. Poulin-Charronnat (2016). Dissociating conscious expectancies from automatic-link formation in an electrodermal conditioning paradigm, *Psychological Research*, vol. 80(4), p. 581-589.

Popper, A.N. (1973). Sound detection and processing by teleost fishes: A critical review, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 53, n° 1515.

Price, D.D. (2015). Unconscious and conscious mediation of analgesia and hyperalgesia, *PNAS*, vol. 112, p. 7624-7625.

Rolls, E.T. (2014). *Emotion and Decision-Making Explained*, Oxford University Press.

Rose, J.D., R. Arlinghaus, S.J. Cooke, B.K. Diggles, W. Sawynok, E.D. Stevens et C.D.L. Wynne (2014). Can fish really feel pain?, *Fish and Fisheries*, vol. 15, p. 97-133.

Schroeder, P. (2018). Pain sensitivity in fish, *CAB Reviews*, vol. 13, n° 049.

Shriver, A.J. (2016). Cortex necessary for pain – but not in sense that matters, *Animal Sentience* 2016, vol. 034.

Singer, P. (1975). *Animal Liberation: A New Ethics for Our Treatment of Animals*, Random House.

Sneddon, L.U. (2003). The evidence for pain in fish: The use of morphine as an analgesic, *Applied Animal Behaviour Science*, vol. 83, p. 153-162.

Sneddon, L.U. (2019). Evolution of nociception and pain: Evidence from fish models, *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 374(1785).

Sneddon, L.U., V.A. Braithwaite et M.J. Gentle (2003). Novel object test: Examining nociception and fear in the rainbow trout, *The Journal of Pain*, vol. 4(8), p. 431-440.

Varner, G. (2012). *Personhood, Ethics, and Animal Cognition: Situating Animal's in Hare's Two Level Utilitarianism*, Oxford University Press.

Varner, G. (2017). Sentience, dans Gruen, L. (dir.). *Critical Terms for Animal Studies*, University of Chicago Press.

Velmans, M. (2012). The evolution of consciousness, dans Canter, D. et D. Tunbull (dir.). *Biologising the Social Sciences*. Contemporary Social Science: Journal of the Academy of Social Sciences.

Woodruff, M.L. (2017). Scientific uncertainty and the animal sentience precautionary principle, *Animal Sentience* 2017, vol. 039.

2 Indicateurs de stress

Conclusions :

1. **Les réponses aux agents stressants internes et externes sont des adaptations normales qui maintiennent l'homéostasie physiologique et augmentent la probabilité de survie d'un poisson.**
2. **Si les réponses physiologiques et comportementales aux agents stressants aigus peuvent être bénéfiques, le stress prolongé ou chronique est maladaptatif et il peut causer des réponses physiologiques et des changements immunosuppresseurs qui nuisent au bien-être des salmonidés et augmentent leur réceptivité aux maladies.**
3. **La mesure du cortisol est le principal moyen d'évaluer le stress dans des situations d'expérience en laboratoire. Toutefois, comme ce dosage est difficile, son utilité est peu probable en pisciculture sauf dans des conditions expérimentales très contrôlées.**
4. **La surveillance de l'activité natatoire et le comportement alimentaire peut être utile dans l'évaluation du bien-être des poissons pendant et après un stress aigu, comme celui de l'entassement pendant le classement et le transport des poissons.**

2.1 Introduction

La réponse au stress est une réponse adaptative normale, extrêmement conservée, de tous les vertébrés, y compris des poissons, aux agents stressants biotiques et abiotiques. Elle entraîne divers changements adaptatifs qui rétablissent l'état physiologique normal ou optimal, un processus nommé allostasie (Schreck et Tort, 2016). En général, les poissons d'élevage ne peuvent pas échapper à certains agents stressants, ce qui cause une réponse au stress prolongée susceptible de menacer leur santé et leur bien-être (Barton, 2002). Un bon niveau de bien-être se reflète dans la capacité du poisson à faire face aux agents stressants infectieux et non infectieux (par exemple Broom, 1996). Par conséquent, des conditions d'élevage stressantes peuvent se traduire par la détérioration de la santé des poissons ainsi que la diminution de leur capacité de défense et leur bien-être. Dans la présente revue de la littérature, nous décrivons brièvement la réponse au stress des salmonidés et examinons les indicateurs pratiques du stress et leurs interprétations.

2.2 La réponse au stress

En situation de stress, les poissons produisent une réponse endocrinienne au stress (primaire) comme celle montrée par d'autres vertébrés (voir la figure 2.1; Donaldson, 1981; Pickering et Pottinger, 1989; Wendelaar Bonga, 1997). Le système nerveux autonome entraîne la libération de catécholamines dans la circulation sanguine en quelques secondes. La concentration de cortisol dans le sang augmente considérablement en quelques minutes, par une activité hormonale en cascade qu'on appelle axe hypothalamo-hypophyso-interrénal (HHI) chez le poisson (analogue à l'axe hypothalamo-hypophyso-surrénalien [HHS] chez les mammifères). Le cortisol agit soit par un effet direct sur les tissus, soit par une régulation positive ou négative de gènes médiant la mobilisation de réserves énergétiques dans le but de rétablir l'état antérieur au stress. Le rétablissement de l'état antérieur au stress peut être important dans certaines conditions

aquacoles stressantes présentées ci-dessous. Le cortisol est un élément essentiel de la réponse au stress chez le poisson, mais il joue aussi un rôle significatif dans l'osmorégulation, la croissance et la reproduction. Les réponses secondaires aux hormones comprennent des modifications du métabolisme, de l'équilibre hydrominéral ainsi que des fonctions cardiovasculaires, respiratoires et immunitaires (voir la figure 2.1). Les réponses tertiaires sont des changements touchant l'animal dans son ensemble, notamment les performances de croissance, sa résistance aux maladies et son comportement (voir la figure 2.1; Schreck et Tort, 2016; Barton, 2002). Le cortisol se lie aux récepteurs du prosencéphale du poisson, ce qui indiquerait la possibilité d'un mécanisme d'observation du fait que le stress interfère avec la fonction cognitive (Schreck et coll., 1997). Un stress prolongé chronique ou répété est nuisible : il est par exemple associé à une diminution de la croissance et à des états pathologiques. Ainsi, la reproduction de conditions de stress prolongé par des implants de cortisol diminue la croissance de la truite arc-en-ciel (Barton et coll., 1987). Un stress prolongé (densité de mise en charge élevée conjuguée à une mauvaise qualité de l'eau) cause une réponse primaire au stress (augmentation du cortisol plasmatique) qui diminue au fil du temps. De plus, il compromet la fonction barrière de la peau, des branchies et de l'intestin, altération associée à une augmentation de la vitesse de déplacement des bactéries dans le poisson qui dure nettement plus longtemps que l'augmentation du cortisol (Sundh et coll., 2019). On sait peu de choses sur la relation mécaniste entre la réponse primaire (catécholamines et cortisol), les modifications de l'intégrité de la barrière et la modification de la fonction immunitaire. À titre d'exemple, Valenzuela et coll. (2018) ont montré que le stress chronique implique deux voies protéolytiques différentes qui ne se chevauchent pas dans le muscle du poisson.

2.3 Catégories d'indicateurs de stress

En aquaculture des salmonidés, il est essentiel de mesurer les indicateurs de stress pour estimer en quoi la santé, les performances et le bien-être sont altérés par les conditions d'élevage. On admet généralement que la réduction des agents stressants, particulièrement des agents stressants chroniques, augmente la survie et la croissance à tous les stades de développement, de l'œuf au stock de géniteurs. Sopinka et coll. (2016), Thorarensen et Farrell (2011) et Noble et coll. (2018) ont passé en revue les indicateurs de stress chez le poisson. Nous nous sommes intéressés à leur étude par Sopinka et coll. (2016), qui examinent de façon intensive et extensive les indicateurs de stress chez le poisson, notamment les indicateurs, les échantillons nécessaires (sang, plasma, tissu par exemple) ainsi que les forces et les faiblesses de chaque indicateur à trois niveaux d'organisation :

1. **Cellulaire et moléculaire** : tous les indicateurs de la catégorie nécessitent des essais extrêmement complexes qui ne seront probablement pas réalisés dans une pisciculture. Les progrès technologiques pourraient faire qu'à l'avenir, des inspecteurs puissent les réaliser à partir d'échantillons prélevés sur place et analysés en laboratoire. Il s'agit de dérivés réactifs de l'oxygène, de protéines de choc thermique, de gènes régulés par le cortisol et d'enzymes intracellulaires.
2. **Physiologique primaire et secondaire** : de tous les facteurs de cette catégorie, les concentrations de cortisol sanguin sont considérées comme l'étalon de référence dans les situations de laboratoire et de recherche. Ce n'est en revanche pas un indicateur utile dans la pisciculture, car il faut rapidement attraper et échantillonner le poisson sans

perturbation pour obtenir des mesures exactes. De plus, les deux essais (essai immunoenzymatique ou radioimmunoessai) sont complexes et nécessitent des instruments coûteux. Pour l'heure, aucun des autres indicateurs de la catégorie n'est susceptible d'être utile en pisciculture, mais comme pour ce qui précède, de futurs progrès technologiques pourraient augmenter la faisabilité de ces mesures.

3. **Ensemble de l'organisme** : les indicateurs de cette catégorie sont probablement les plus utiles en pisciculture, particulièrement après un stress transitoire : transport, classement et moments après ou juste avant la capture. Les effets d'un stress prolongé pourraient être surveillés par des observations du comportement, particulièrement pendant l'alimentation : baisse de la réaction à l'alimentation, de la consommation mensuelle d'aliments, du gain de biomasse et de l'indice de conversion par exemple. Il faut aussi surveiller d'éventuels changements morphologiques – comme la modification de la couleur ou l'érosion des nageoires – qui peuvent être des indicateurs utiles. L'incidence de la mortalité quotidienne est un indicateur important de la santé globale des poissons d'un réservoir ou d'une cage (Iversen et coll., 2005) mais, idéalement, d'autres indicateurs doivent être utilisés avant la mortalité causée par le stress. Citons comme exemples d'agents stressants chroniques les mycotoxines dans les aliments ou une densité de mise en charge élevée conjuguée à une mauvaise qualité de l'eau (Sundh et coll., 2019).

2.4 Procédures stressantes

2.4.1 *Stress pendant le transport*

Le transport des salmonidés entre sites d'élevage (c'est-à-dire de réservoirs d'eau douce vers des parcs en filet marins ou des bassins allongés [de type raceway] d'eau douce) ou encore vers l'abattage peut être stressant. Les flambées épidémiques se produisent souvent dans les premiers mois suivant le transfert de smolts (saumoneaux) vers des sites marins (Iversen et coll., 2005). Toutefois, certaines études jugent que le transport des smolts est seulement « moyennement stressant » (Nomura et coll., 2009). Iversen et coll. (2005) rapportent que le chargement est l'événement le plus stressant pendant le transport (c'est-à-dire l'événement produisant la réponse au cortisol la plus importante) et que la multiplication des agents stressants (par exemple des paquets de mer pendant le transport) augmentait la mortalité dans les 30 jours qui suivent d'au moins 20 fois pour arriver à un total de 18 %. Le cortisol plasmatique a été corrélé à une mortalité subséquente contrairement au glucose et au lactate sanguins. Les technologies actuelles permettent de mesurer quelques indicateurs de façon pratique pendant le transport, mais non pas les augmentations marquées du comportement natatoire étant donné que les poissons sont entassés (Chandroo et coll., 2005). Cependant, dans les jours suivant le transport, il peut être utile d'observer les changements de comportement alimentaire et la mortalité (abordés plus haut).

2.4.2 *Stress pendant le classement*

En général, les alevins sont classés avant le grossissement. Le classement peut réduire les interactions agonistiques liées à la taille (par exemple Adams et coll., 2000; Lahti et Lower, 2000; Wipf et Barnes, 2011; Cvetkovikj et coll., 2015) et permet de décider de la taille optimale des aliments en granulés. Comme pour le transport, certaines mesures peuvent être appliquées pendant le processus de classement, mais non pas les augmentations marquées du comportement

natatoire (Chandroo et coll., 2005). Il est cependant utile d'observer les changements de comportement alimentaire et les mortalités cumulatives (dont il est question plus haut) dans les jours suivant le classement du poisson.

2.5 Indicateurs de stress

Le stress qui suit une des procédures stressantes mentionnées précédemment ou les effets d'un stress prolongé peuvent être surveillés par l'observation des indicateurs indiqués dans la catégorie « Ensemble de l'organisme » (Sopinka et coll., 2016). Certains indicateurs sont détectables par des vérifications régulières, pendant l'alimentation, ou par des caméras placées dans les parcs en filet, tandis que d'autres nécessitent des essais spécifiques. Les indicateurs doivent être pertinents dans le cas du poisson, utilisables dans les piscicultures, suffisamment fiables pour permettre des décisions éclairées dans la pisciculture et applicables à l'opération aquacole visée (Noble et coll., 2018).

2.5.1 *Changements morphologiques*

Le stress chronique peut se manifester par deux changements morphologiques : la couleur de la peau et l'érosion des nageoires. La pigmentation des poissons est causée par des cellules nommées « chromatophores » qui contiennent un pigment ou des « iridophores » produisant une iridescence par la diffraction de la lumière. Les changements de couleur s'expliquent par la contraction (coloration moindre ou « éclaircissement ») ou la dispersion de ces cellules. Les chromatophores sont régulés par des hormones et des nerfs et ils possèdent des récepteurs alpha-adrénergiques ou bêta-adrénergiques sur leur membrane, susceptibles d'être stimulés par la noradrénaline pour produire une contraction ou une dispersion. En général, les catécholamines libérées pendant un stress causent la contraction des chromatophores et par conséquent l'éclaircissement de la couleur du poisson (Thorsen, 2019).

L'érosion des nageoires est causée par l'abrasion contre des surfaces rugueuses, des interactions agonistiques, une carence nutritionnelle et une infection bactérienne ou par le pou du poisson (Hamoutene et coll., 2016). On ne sait pas toujours si le stress est dû à la persistance de l'érosion des nageoires ou si cette lésion persiste parce que la réponse à un stress causé par un autre stimulus supprime la fonction immunitaire et la guérison de la blessure (voir par exemple la *section 5 : Densité biologique*).

2.5.2 *Changements comportementaux*

Le comportement est probablement le meilleur indicateur quotidien du stress et du bien-être. Son observation n'est pas invasive et donne une indication immédiate de l'état du poisson. Il doit toutefois être prudemment interprété, car toute collecte incorrecte de données risque de conduire à une interprétation subjective. De nombreuses piscicultures ont installé des caméras ou des échosondeurs pour surveiller le comportement des poissons (particulièrement l'alimentation et les pertes et gaspillages de nourriture), mais ces instruments peuvent aussi servir à surveiller le rassemblement en bancs ainsi que les activités quotidiennes et les déplacements (par exemple Juell et Fosseidengen, 2004).

2.5.2.1 Appétit et comportement alimentaire

On ne connaît que partiellement les mécanismes précis liant la suppression d'appétit à la réponse au stress, mais des données prouvent que certains éléments de l'axe hypothalamo-hypophyso-interrénel (HHI) médient les effets supprimeurs de l'appétit du stress (Bernier et Peter, 2001). Dans la pratique, les modifications du comportement exploratoire, de l'activité d'anticipation de la nourriture, de la latence à l'alimentation ou de la quantité de nourriture nécessaire pour atteindre la satiété indiquent une réponse au stress. Chez le saumon de l'Atlantique, le stress associé aux changements de la qualité de l'eau (Espmark et Baeverfjord, 2009), à la vaccination (Sørum et Damsgård, 2004) ou à la prédation peut réduire la prise alimentaire. La diminution de la réponse d'anticipation de la nourriture peut aussi être un signe de stress (Folkedal et coll., 2012).

2.5.2.2 Autres comportements

Des comportements inhabituels ou un changement de comportement marqué, comme une perte d'équilibre, un déplacement lent ou une position verticale inhabituelle (Fernö et coll., 1995) – chez quelques poissons ou la plupart des poissons (Bui et coll., 2013) – indiqueraient un stress aigu. Des déplacements non structurés vers le fond du parc en filet, du réservoir ou du conteneur peuvent aussi indiquer un stress aigu (Bui et coll., 2013). En général, le saumon nage en banc de manière continue et dans une même direction (polarisation, mais la direction de déplacement peut varier d'un parc à l'autre) pendant la journée, avec quelques poissons se trouvant au centre ou près du bord du parc (Sutterlin et coll., 1979). L'évolution de l'activité en surface (comme les sauts ou les retournements) doit être mesurée et peut servir à calculer les sauts par poisson dans le parc sur une durée de 5 minutes. En effet, le nombre de sauts et de retournements augmente sensiblement aux premiers stades d'une infestation par le pou du poisson (Samsing et coll., 2015; Webster et coll., 2007). L'orientation par rapport au courant en direction des zones à débit élevé est courante chez les salmonidés stressés (Ross et coll., 1995).

2.5.2.3 Comportements réflexes

Le réflexe de redressement (retour à une position droite normale après avoir été tourné ventre vers le haut) et le réflexe de réaction au pincement de la queue (tentative de s'échapper en cas de pincement de la queue) peuvent servir d'indicateurs du stress (Davis, 2010). Les essais sont simples, rapides et peu coûteux. Ils sont altérés quand on impose un agent stressant (Davis, 2010) et s'utilisent facilement sur le terrain (par exemple Campbell et coll., 2009; McLean et coll., 2016). Toutefois, comme on ne dispose pas de données liant ces changements de réflexe à des concentrations de cortisol ou d'autres indicateurs du stress, il faut valider davantage cet indicateur, notamment pour déterminer le degré de stress du poisson auquel ces deux réflexes deviennent défaillants.

2.5.2.4 Taux de ventilation

L'augmentation de la fréquence respiratoire (mouvements operculaires) ou une respiration haletante à la surface indiquerait une eau à faible teneur en oxygène ou une réponse au stress causée par d'autres variables. Par exemple, la fréquence respiratoire augmente de 55 à 81 mouvements operculaires par minute quand les poissons sont entassés avant l'abattage

(Erikson et coll., 2016) et de 108 à 162 mouvements operculaires par minute chez les smolts pendant l'épouillage (Vigen, 2008). Il faut toutefois noter que plusieurs des agents stressants employés en laboratoire aux fins de provocation d'une réponse au stress au cours d'une recherche (comme le fait d'entasser, d'attraper à l'aide d'un filet ou de sortir le poisson de l'eau) entraînent une hypoxémie chez le poisson.

2.6 Mises en garde

En raison de certaines incertitudes, quelques mises en garde s'imposent dans l'interprétation des indicateurs de stress mentionnés précédemment, comme l'expliquent Sopinka et coll. (2016). Premièrement, deux poissons présentant un niveau identique pour un indicateur de stress élevé à un temps d'échantillonnage (par exemple de cortisol plasmatique) peuvent être l'un dans une trajectoire de mort et l'autre dans une trajectoire de rétablissement. En effet, chez d'autres animaux, la concentration de cortisol augmente en réponse à des expériences affectives négatives et positives, et cela pourrait être le cas pour le poisson (voir Ellis et coll., 2012), ce qui nécessiterait d'examiner la concentration de cortisol ainsi que son contexte, sans l'en isoler. Deuxièmement, l'exposition à un agent stressant identique entraîne une concentration de cortisol plasmatique, une fonction immunitaire et un comportement variables selon les espèces, y compris chez des espèces très proches (par exemple le saumon rose et le saumon rouge, Donaldson et coll., 2014), entre sexes d'une même espèce (par exemple la femelle adulte du saumon du Pacifique présente des concentrations de cortisol plasmatique induit par des agents stressants plus élevées [Donaldson et coll., 2014] et une probabilité plus grande de stress induit par la température et de mortalité que les mâles [Martins et coll., 2012]), et même entre individus d'une même espèce (par exemple, les styles de défense varient selon les individus, Vaz-Serrano et coll., 2011). Troisièmement, les effets du stress peuvent se reporter, c'est-à-dire que le stress ressenti par les parents est susceptible de s'exprimer dans des changements de performances chez la génération suivante et l'ampleur de la réponse au stress peut s'hériter (par exemple des saumons de l'Atlantique et des truites arc-en-ciel ont été élevés pour exprimer un cortisol plasmatique élevé ou bas et des réponses comportementales à un agent stressant normalisé [Sopinka et coll., 2016]). Quatrièmement, l'ampleur de la réponse au stress varie selon le stade du cycle biologique. Ainsi, les salmonidés sont généralement hyporéactifs au début de leur développement, mais hyperréactifs au stade de smolts. Il faut donc veiller à utiliser les indicateurs de stress correspondant au stade du cycle biologique visé ou des indicateurs dont on connaît les variations d'interprétation selon les stades du cycle.

2.7 Références

Adams, C., F. Huntingford, J. Turnbull, S. Arnott et A. Bell (2000). Size heterogeneity can reduce aggression and promote growth in Atlantic salmon parr, *Aquaculture International*, vol. 8, p. 543-549.

Barton, B. (2002). Stress in fishes: A diversity of responses with particular reference to changes in circulating corticosteroids, *Integrative and Comparative Biology*, vol. 42(3), p. 517-525.

Barton, B.A., C.B. Schreck et L.D. Barton (1987). Effects of chronic cortisol administration and daily acute stress on growth, physiological conditions, and stress responses in juvenile rainbow trout, *Diseases of Aquatic Organisms*, vol. 2, p. 173-185.

Bernier, N.J. et R.E. Peter (2001). The hypothalamic-pituitary-interrenal axis and the control of food intake in teleost fish, *Comparative Biochemistry and Physiology, Part B*, vol. 129(2-3), p. 639-644.

Broom, D.M. (1996). Animal welfare defined in terms of attempts to cope with the environment, *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A – Animal Science Supplement*, vol. 27, p. 22-28.

Bui, S., F. Oppedal, O.J. Korsoen, D. Sonny et T. Demster (2013). Group behavioural responses of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) to light, infrasound and sound stimuli, *PLoS One*, vol. 8(5), n° e63696.

Campbell, M.D., R. Patino, J. Tolan, R. Strauss et S.L. Diamond (2009). Sublethal effects of catch-and-release fishing: measuring capture stress, fish impairment, and predation risk using a condition index, *ICES Journal of Marine Science*, vol. 67, p. 513-521.

Chandroo, K.P., S.J. Cooke, R.S. McKinley et R.D. Moccia (2005). Use of electromyogram telemetry to assess the behavioural and energetic responses of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum) to transportation stress, *Aquaculture Research*, vol. 36, p. 1226-1238.

Cvetkovikj, A., M. Radeski, D. Blazhekovikj-Dimovska, V. Kostov et V. Stevanovski (2015). Factors affecting fin damage of farmed rainbow trout, *Macedonian Veterinary Review*, vol. 38(1), p. 61-71.

Davis, M.W. (2010). Fish stress and mortality can be predicted using reflex impairment, *Fish and Fisheries*, vol. 11, p. 1-11.

Donaldson, E.M. (1981). The Pituitary-Interrenal Axis as an indicator of stress in fish, dans Pickering, A.D. (dir.). *Stress and Fish*, Academic Press, London, p. 11-48.

Donaldson, M.R., S.G. Hinch, K.M. Jeffries, D.A. Patterson, S.J. Cooke, A.P. Farrell et K.M. Miller (2014). Species- and sex-specific responses and recovery of wild, mature pacific salmon to an exhaustive exercise and air exposure stressor, *Comparative Biochemistry and Physiology Part A*, vol. 173, p. 7-16.

Ellis, T., H.Y. Yildiz, J. López-Olmeda, M.T. Spedicato, L. Tort, Ø. Øverli et C.I.M. Martins (2012). Cortisol and fish welfare, *Fish Physiology and Biochemistry*, vol. 38, p. 163-188.

Erikson, U., L. Gansel, K. Frank, E. Svendsen et H. Digre (2016). Crowding of Atlantic salmon in net-pen before slaughter, *Aquaculture*, vol. 465, p. 395-400.

Espmark, A.M. et G. Baeverfjord (2009). Effects of hyperoxia on behavioural and physiological variables in farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*) parr, *Aquaculture International*, vol. 17, p. 341-353.

Fernö, A., I. Huse, J.E. Juell et Å. Bjordal (1995). Vertical distribution of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in net pens: Trade-off between surface light avoidance and food attraction, *Aquaculture*, vol. 132(3-4), p. 285-296.

Folkedal, O., L.H. Stien, T. Torgersen, F. Oppedal, R.E. Olsen, J.E. Fosseidengen, V. Braithwaite et T.S. Kristiansen (2012). Food anticipatory behaviour as an indicator of stress response and recovery in Atlantic salmon post-smolt after exposure to acute temperature fluctuation, *Physiology and Behaviour*, vol. 105(2), p. 350-356.

- Hamoutene, D., J.S. Mitchell, H.M. Murray, A. Eaves, K. Marshall, R. Belley et S. George (2016). The effect of light regimen on settlement patterns of sea lice, *Lepeophtheirus salmonis*, on Atlantic salmon, *Salmo salar*, post-smolts while taking into account fish size and fin erosion in a static tank system, *Aquaculture*, vol. 465, p. 1-6.
- Iversen, M., B. Finstad, R.S. McKinley, R.A. Eliassen, K.T. Carlsen et T. Evjen (2005). Stress responses in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) smolts during commercial well boat transports, and effects on survival after transfer to sea, *Aquaculture*, vol. 243, 373-382.
- Juell, J. et J.E. Fosseidengen (2004). Use of artificial light to control swimming depth and fish density of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in production cages, *Aquaculture*, vol. 233, p. 269-82.
- Lahti, K. et N. Lower (2000). Effects of size asymmetry on aggression and food acquisition in Arctic charr, *Journal of Fish Biology*, vol. 56, p. 915-922.
- Madureira, T.V., J.L. Costa, F. Malhão, C. Lopes, J.F. Gonçalves et E. Rocha (2019). Design of a multi-parametric profile for assessing the acclimation period of juvenile brown trout after an acute transport to new housing environment, *Applied Animal Behaviour Science*, vol. 219, n° 104835.
- Martins, E.G., S.G. Hinch, D.A. Patterson, M.J. Hague, S.J. Cooke, K.M. Miller, D. Robichaud, K.K. English et A.P. Farrell (2012). High river temperature reduces survival of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) approaching spawning grounds and exacerbates female mortality, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 69(2), p. 330-342.
- McLean, M.F., K.C. Hanson, S.J. Cooke, S.G. Hinch, D.A. Patterson, T.L. Nettles, M.K. Litvak et G.T. Crossin (2016). Physiological stress response, reflex impairment and delayed mortality of white sturgeon *Acipenser transmontanus* exposed to simulated fisheries stressors, *Conservation Physiology*, vol. 4(1):cow031.
- Noble, C., K. Gismervik, M.H. Iversen, J. Kolarevic, J. Nilsson, L.H. Stien et J.F. Turnbull (dir.) (2018). *Welfare Indicators for Farmed Atlantic Salmon: Tools for Assessing Fish Welfare*, Nofima.
- Nomura, M., K.A. Sloman, M.A.G. von Keyserlingk et A.P. Farrell (2009). Physiology and behaviour of Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts during commercial land and sea transport, *Physiology & Behavior*, vol. 96, p. 233-243.
- Pickering, A.D. et T.G. Pottinger (1989). Stress responses and disease resistance in salmonid fish: Effects of chronic elevation of plasma cortisol, *Fish Physiology and Biochemistry*, vol. 7(1-6), p. 253-258.
- Ross, R.M., B.J. Watten, W.F. Krise, M.N. DiLauro et R.W. Soderberg (1995). Influence of tank design and hydraulic loading on the behavior, growth, and metabolism of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), *Aquacultural Engineering*, vol. 14(1), p. 29-47.
- Samsing, F., D. Solstorm, F. Oppedal, F. Solstorm et T. Dempster (2015). Gone with the flow: Current velocities mediate parasitic infestation of an aquatic host, *International Journal for Parasitology*, vol. 45, p. 559-565.

- Schreck, C.B. et L. Tort (2016). The concept of stress in fish, dans Schreck, C.B., L. Tort, A.P. Farrell et C.J. Browner (dir.). *The Biology of Stress in Fish*, vol. 35, *Fish Physiology*, Elsevier/Academic Press, Amsterdam, p. 1-37.
- Schreck C.B., B.L. Olla et M.W. Davis (1997). Behavioral responses to stress. Dans Iwama G.K., Pickering A.D., Sumpter J.P. et C.B. Schreck (éds). *Fish Stress and Health in Aquaculture*. Cambridge University Press: Cambridge.
- Solstorm, F., D. Solstorm, F. Oppedal, R.E. Olsen, L.H. Stien et A. Fernö (2016). Not too slow, not too fast: Water currents affect group structure, aggression and welfare in post-smolt Atlantic salmon *Salmo salar*, *Aquaculture Environment Interactions*, vol. 8, p. 339-347.
- Sopinka, N.M., M.R. Donaldson, C.M. O'Connor, C.D. Suski et S.J. Cooke (2016). Stress indicators in fish, dans Schreck, C.B., L. Tort, A.P. Farrell et C.J. Browner (dir.). *The Biology of Stress in Fish*, vol. 35, *Fish Physiology*, Elsevier/Academic Press, Amsterdam, p. 405-462.
- Sørum, U. et B. Damsgård (2004). Effects of anaesthetisation and vaccination on feed intake and growth in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.), *Aquaculture*, vol. 232, p. 333-341.
- Sundh, H., F. Finne-Fridell, T. Ellis, G.L. Taranger, L. Niklasson, E.F. Pettersen, H.I. Wergeland et K. Sundell (2019). Reduced water quality associated with higher stocking density disturbs the intestinal barrier functions of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.), *Aquaculture*, vol. 512, n° 734356.
- Sutterlin, A.M., K.L. Jokola et B. Holte (1979). Swimming behaviour of salmonid fish in ocean pens, *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, vol. 36, p. 948-954.
- Thorarensen, H. et A.P. Farrell (2011). The biological requirements for post-smolt Atlantic salmon in closed-containment systems, *Aquaculture*, vol. 213(1-4), p. 1-14.
- Thorsen, D.K. (2019) Melanin-based skin pigmentation and stress in Atlantic salmon (*Salmo salar*), thèse de maîtrise en sciences, Sciences biologiques de l'aquaculture, Université norvégienne des sciences de la vie, Norvège.
- Valenzuela, C.A., R. Zuloaga, L. Mercado, I.E. Einarsdottir, B.T. Björnsson, J.A. Valdés et A. Molina (2018). Chronic stress inhibits growth and induces proteolytic mechanisms through two different nonoverlapping pathways in the skeletal muscle of a teleost fish, *American Journal of Physiology – Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, vol. 314(1), n° R102-R113.
- Vaz-Serrano, J., M.L. Ruiz-Gomez, H.M. Gjøen, P.V. Skov, F.A. Huntingford, Ø. Øverli et E. Höglund (2011). Consistent boldness behaviour in early emerging fry of domesticated Atlantic salmon (*Salmo salar*): decoupling of behavioural and physiological traits of the proactive stress coping style, *Physiology and Behaviour*, vol. 103(3-4), p. 359-364.
- Vigen, J. (2008). Oxygen variation within a seacage, thèse de maîtrise en sciences, Département de biologie, Université de Bergen, Norvège.
- Webster, S.J., L.M. Dill et K. Butterworth (2007). The effect of sea lice infestation on the salinity preference and energetic expenditure of juvenile pink salmon (*Oncorhynchus gorboscha*), *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 64, p. 671-680.

Wendelaar Bonga, S.E. (1997). The stress response in fish, *Physiological Reviews*, vol. 77, p. 591-625.

Wipf, M.M. et M.E. Barnes (2011). Competitor density and size effects on aggression and feeding in cutthroat trout: Implications for aquaculture, *The Open Fish Science Journal*, vol. 4, p. 62-66.

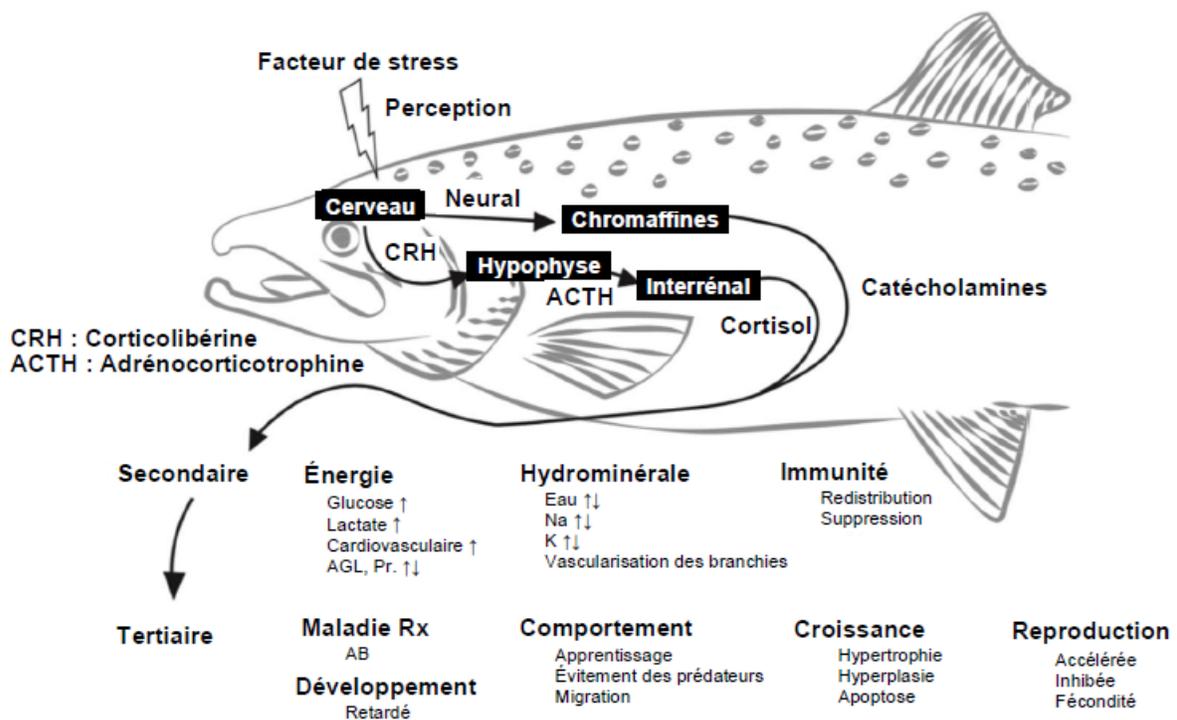


Figure 2.1 Réponses primaire, secondaire et tertiaire du poisson en cas de détresse.

D'après Schreck et Tort (2016). CRH : corticolibérine (pour *corticotropin releasing hormone*); ACTH : adrénocorticotrophine; AGL : acides gras libres; Pr. : protéines; AC : anticorps.

3 Pou du poisson : infection et traitement

Coauteur : Mark Fast, PhD (Université de l'Île-du-Prince-Édouard)

Conclusions :

- 1. L'infection par le pou du poisson peut causer une ulcération cutanée légère à sévère, nuisible à la santé du poisson, à sa sensibilité à d'autres agents pathogènes et au bien-être du poisson d'élevage.**
- 2. Le seuil du nombre de poux par poisson à partir duquel le bien-être est compromis varie selon le stade du cycle de vie et la taille de l'hôte. Les petits poissons (smolts) peuvent sentir un léger stress à des niveaux d'infection très bas comme trois poux mobiles par poisson, mais plus la taille de l'hôte est grande, plus l'incidence du même niveau d'infection diminue.**
- 3. Plusieurs agents médicamenteux servent à lutter contre le pou du poisson. Leur application nécessite une plus grande manipulation des poissons traités, qui est susceptible d'entraîner un stress. De plus, comme certains agents sont toxiques quand ils sont incorrectement dosés, leur application doit être adéquate. Ajoutons que les poux ayant développé une résistance à la plupart des agents chimiothérapeutiques, les poissons subissent parfois des traitements répétés. Les effets de ces traitements répétés sur le poisson ne sont pas suffisamment établis par la littérature.**
- 4. Les méthodes réduisant le risque d'infection par le pou du poisson et ne nécessitant pas l'entassement et la manipulation des poissons (par exemple alimentation en profondeur, éclairage en eau profonde, etc.) comportent moins de risques pour le bien-être que les méthodes impliquant la manipulation des individus, l'application d'agents chimiothérapeutiques et d'autres facteurs potentiellement aversifs.**
- 5. Concernant les stratégies d'intervention non médicinales ou alternatives – températures de l'eau élevées, faible salinité, prélèvement physique et barrières de cages par exemple – seules des recherches approfondies permettront de déterminer leur incidence sur le bien-être du poisson. De récents travaux ont montré que l'exposition à des températures de l'eau élevées pendant un traitement thermique de 5 minutes au plus est associée à des réactions de panique (et des problèmes secondaires), et qu'une exposition pendant 72 à 140 secondes peut causer une brûlure thermique et la mort. De futurs travaux devront définir les incidences des autres stratégies sur le bien-être.**
- 6. Il faut des méthodes de modélisation pour décrire plus exactement la connectivité réseau des exploitations, ainsi que des modèles bioéconomiques pour déterminer les seuils de traitement optimaux en mesure de protéger les stocks de poissons sauvages et prévenir l'infection entre piscicultures, tout en réduisant au minimum les traitements coûteux et la sélection aux fins de pharmacorésistance.**

3.1 Introduction

Le pou du poisson est un parasite commun sur les poissons marins sauvages et d'élevage. Les effets de ces infections parasitaires sur l'hôte sont variables et dépendent de nombreux facteurs environnementaux et de gestion. L'espèce la plus courante dans les élevages, le saumon de l'Atlantique (*Salmo salar* L.), est une des espèces la plus sensible à une infection par le pou du poisson. De plus, les densités de mise en charge et les milieux des élevages peuvent exacerber les infections. Dans la plupart des régions où le saumon est élevé en cages flottantes (comme en Norvège, au Chili, en Écosse, en Irlande et au Canada), les infections par le pou du poisson sont transmissibles aux populations de poissons sauvages et sont tellement amplifiées dans les exploitations que des stratégies d'intervention et de gestion importantes doivent être déployées en vue de prévenir les problèmes de bien-être chez les poissons d'élevage et la pression de la propagation de l'infestation chez les populations de saumons sauvages de la zone.

La gestion des infections par le pou du poisson est difficile. Plusieurs méthodes chimiques et non chimiques de lutte contre le pou du poisson ont été utilisées. Tous les grands producteurs de saumon ont mis en vigueur des règlements nationaux demandant aux producteurs de régulièrement compter et déclarer le nombre de poux du poisson sur les saumons de leurs parcs en filet et de les traiter au-delà d'un seuil prédéfini. Malheureusement, les poux ont développé une résistance à la plupart des traitements chimiques. Plusieurs nouvelles méthodes non chimiques de lutte contre les infections sont prometteuses, comme la modification des températures, de la salinité ou de l'éclairage ou encore l'utilisation de « poissons-nettoyeurs », d'un épouillage physique et de barrières mécaniques. Certaines pourraient modifier le comportement du poisson pour qu'il évite les stades infectieux du pou du poisson. Un plan de lutte intégrée contre les organismes nuisibles (ou lutte intégrée, LI) incorporant plusieurs modalités de traitement et de lutte est probablement la méthode la plus prometteuse de gestion des infections par le pou du poisson. La présente revue de la littérature décrit d'importantes caractéristiques du pou du poisson ainsi que la manière dont les mesures de surveillance et de traitement des infections sont susceptibles d'affecter la santé et le bien-être optimaux du poisson.

3.2 Biologie et cycle biologique du pou du poisson

« Pou du poisson » est le nom courant de copépodes ectoparasites de la famille *Caligidae*. Ces parasites se nourrissent du mucus, de la peau et du sang de leur hôte, causant les incidences mentionnées plus haut. Plusieurs espèces de poux du poisson ont été décrites dans l'Atlantique Nord et le Pacifique (Kabata, 1988; Jones et Johnson, 2015). *L. salmonis* sous-espèce *salmonis* (Atlantique) ou *oncorhynchii* (Pacifique) sont les plus préoccupantes dans l'hémisphère nord, tandis que dans le Pacifique Sud, l'espèce la plus préoccupante est *C. rogercresseyi* (Fast et Dalvin, à paraître). D'autres espèces de poux du poisson infectent les saumons d'élevage : *C. elongatus* et *C. curtis* dans l'Atlantique Nord (Hogans et Trudeau, 1989; Hemmingsen et coll., 2020), et *C. clemensii* et *Lepeophtheirus cuneifer* dans le Pacifique Nord (Jones et Johnson, 2015). Dans différents lieux, les salmonidés sauvages ou d'élevage, qu'ils soient résidents ou migrants, peuvent agir comme sources d'infection. Ces espèces de poux ont un cycle biologique direct composé de 8 stades, tous séparés par une mue (Gonzalez et Carvajal, 2003; Hamre et coll., 2013). Ce cycle biologique consiste en trois stades planctoniques larvaires, dont le dernier est parasitaire et doit, avant l'épuisement de ses réserves énergétiques, infecter un hôte. Après l'infection, la décomposition des étapes varie selon les espèces de copépodes Caligidés

(c'est-à-dire deux stades chalimus et deux stades pré-adultes chez *L. salmonis* contre quatre stades chalimus et aucun stade pré-adulte chez *C. rogercresseyi*) avant la maturation au stade adulte. Après la maturation et l'accouplement, les femelles adultes produisent des centaines de milliers de larves nageuses capables d'infecter d'autres poissons (Figure 3.1; Hamre et coll., 2013).

La biologie des poux, l'infection et le développement des poux dépendent fortement de la température de l'eau et de la salinité. De façon naturelle, l'infection par *Lepeophtheirus salmonis* et *C. rogercresseyi* et leur développement sur le saumon hôte se produisent entre 4 et 21 °C à des salinités >27 ppm. En dessous de 5 °C ou d'une salinité de 27 ppm, le développement du pou (à tous les stades planctoniques et parasitaires) et l'infection sont gravement compromis. Aux températures les plus élevées (>18 °C), bien que le développement soit nettement plus rapide, la survie des adultes et la viabilité des œufs sont en péril (Bricknell et coll., 2006; Samsing et coll., 2016; Montory et coll., 2018; Hamre et coll., 2019). Par exemple, à 10 °C, le temps écoulé entre l'infection et la production du premier œuf sur *L. salmonis* est d'approximativement 47 jours, alors qu'il serait de 27 jours à 15 °C d'après les données d'Hamre et coll. (2019).

3.3 Effets du pou du poisson

Des densités élevées du parasite sur le poisson, particulièrement aux stades du cycle biologique adultes et pré-adultes mobiles, peuvent causer des lésions importantes, car ils se regroupent en grand nombre autour de la tête et sur la partie postérieure de la nageoire anale, se nourrissant principalement de la peau, du mucus et du sang de l'hôte (Johnson et Fast, 2004; Wagner et coll., 2008; Heggland, 2020). Le stress osmorégulateur chez les juvéniles ou le stress associé à l'hématophagie intensive sur les poissons hôtes de toute taille peut causer une hausse chronique des concentrations de cortisol et la réduction d'un taux de croissance donné et de la croissance globale (travaux examinés dans Johnson et Fast, 2004; travaux examinés dans Wagner et coll., 2008; Fjellidal et coll., 2019). Abolofia et coll. (2017) ont étudié la perte de biomasse totale par cycle de production en Norvège (causée par l'incidence des poux sur la croissance et la mortalité) et ont estimé qu'elle variait de 3,6 à 16,6 %, malgré différentes mesures de lutte, particulièrement des traitements chimiques anti-poux (application d'antiparasitaires).

L'infection au pou du poisson a d'autres effets indirects comme la transmission d'agents pathogènes ou la vulnérabilité croissante de l'hôte à d'autres infections. On a observé de nombreux pathogènes pour le saumon provenant d'individus *L. salmonis*/*C. rogercresseyi* et montré que ces pathogènes causaient des pathologies plus importantes en cas de co-infection du saumon hôte par le pou du poisson. Il s'agit notamment du virus de la nécrose hématopoïétique infectieuse (Long et coll., 2019), de *Loma salmonae* (Mustafa et coll., 2000), de *Piscirickettsia salmonis* (Figuerola et coll., 2017) et du virus de l'anémie infectieuse du saumon (ISAV pour isavirus; Oelckers et coll., 2014; Barker et coll., 2019). Bien qu'on manque de données prouvant le rôle du pou du poisson comme véritable vecteur des pathogènes mentionnés (en effet, la présence d'agents pathogènes dans le pou ne démontre pas nécessairement qu'ils ont été transmis par le pou), le pou du poisson est un immunomodulateur connu de ses hôtes et il peut accroître la sensibilité du poisson aux pathogènes cités (Fast, 2014).

3.4 Surveillance, contrôle et traitement des infections par le pou du poisson

3.4.1 Surveiller les infections par le pou du poisson

Le plus souvent, le nombre de poux du poisson infectant les saumons est déterminé par le prélèvement d'un échantillon de saumon dans un parc en filet suivi d'un décompte manuel des poux. Cependant, les caméras et les systèmes de compteurs sous-marins qui servent à surveiller l'alimentation, le comportement, etc. des saumons dans les parcs en filet sont de plus en plus courants et ils sont adaptés aux fins de comptage des poux du poisson sur des individus (Gautam et coll., 2017). Cette évolution pourrait favoriser le bien-être du saumon, car elle limiterait le stress aigu associé aux manipulations répétées nécessaires au comptage des poux.

Des seuils à partir desquels une intervention est requise (généralement exprimés en nombres de poux du poisson d'un sexe ou d'un stade du cycle biologique donné par poisson) sont utilisés par les autorités de l'industrie aquacole de l'hémisphère nord (par exemple, en Colombie-Britannique des mesures de traitement ou de récolte sont requises entre avril et juin si les niveaux de *L. salmonis* sont supérieurs à 3 poux mobiles par poisson). Dans certains pays comme la Norvège, les seuils définis peuvent être bas, comme 0,5 pou femelle mature par poisson (0,2 pendant la migration). Dans les deux cas toutefois, ces seuils ne sont pas motivés par le bien-être du poisson d'élevage, mais par des objectifs de conservation; ils visent en effet à limiter la propagation des infections chez les smolts sauvages passant par les parcs en filet. Des travaux antérieurs montrent en effet que les post-smolts peuvent présenter des signes de stress chronique ou aigu en cas d'infection à partir de 3 poux mobiles par poisson (Nolan et coll., 1999) et que la sensibilité à l'isavirus augmenterait à ces niveaux d'infection (Barker et coll., 2019). Stien et coll. (2013) et Grimnes et Jakobsen (1996) avancent que les infections par le pou du poisson deviennent létales autour de 0,12 à 0,15 pou par cm² de poisson. Toutefois, Johnson et Fast (2004) et Wagner et coll. (2008) font remarquer que les effets des poux mobiles dépendent de l'espèce et de la taille de l'hôte. Par conséquent, bien qu'un stress modéré chez les post-smolts (~100-300 g) ait été observé à ces niveaux d'infection (3 poux mobiles/poisson), l'incidence d'un même niveau d'infection diminue quand le poisson croît. Ainsi, chez les saumons de l'Atlantique dans leur deuxième année en mer (≥ 1 kg), âge auquel les traitements sont les plus courants, aucun élément ne prouve directement qu'ils subissent des incidences physiologiques de l'infection par le pou du poisson à ce niveau, mais il faudrait mener d'autres recherches sur les effets sublétaux d'une infection par le pou du poisson (par exemple Brauner et coll., 2012) aux différents stades du cycle biologique et pour plusieurs espèces de salmonidés. En effet, en raison des grandes incertitudes sur ces types de seuils quantitatifs (par exemple Heuch et coll., 2011), il est difficile de tirer des conclusions définitives sur le moment à partir duquel il faut intervenir. Idéalement, les seuils de traitement devraient protéger les saumons migrateurs, éviter les coûteuses infections entre exploitations et réduire la sélection à des fins de pharmacorésistance. De récents travaux de modélisation ont commencé à dessiner un cadre de détermination des seuils de traitement anti-poux optimaux sur le saumon (Kragesteen et coll., 2019). Les résultats montrent qu'un seuil de traitement trop bas entraîne des taux élevés de traitement, mais que dans des cas de connectivité égale (entre exploitations) dans un réseau de salmonicultures, des seuils bas (0,1 femelle gravide/poisson) peuvent maximiser la survie et le poids des saumons (Kragesteen et coll., 2019). Bien que les auteurs soulignent qu'il est essentiel d'estimer une connectivité réaliste pour obtenir des sorties de modèle utiles et que cet exercice aurait excessivement simplifié d'autres données d'entrée fondamentales comme les pressions d'infestation externes et l'efficacité des traitements, ces types de modèles bioéconomiques seront probablement des outils importants de la définition fine de seuils de traitement par région, voire par réseau d'exploitations aquacoles.

3.4.2 *Traitement chimique contre le pou du poisson*

Plusieurs traitements servent à lutter contre le pou du poisson (Aaen et coll., 2015; Grant, 2002; Hjeltnes et coll., 2019). La plupart ont été à l'origine mis au point et utilisés dans la lutte antiparasitaire dans les élevages terrestres et chez l'humain. En général, les poissons infectés par le pou sont traités par l'application d'agents chimiothérapeutiques dans les parcs en filet bâchés (afin de contenir les produits chimiques), par bain dans les bateaux-viviers ou par leur introduction dans l'alimentation.

Quand leur utilisation respecte le mode d'emploi ou les indications d'un vétérinaire, la plupart des produits chimiques anti-poux ont peu d'effets indésirables sur le poisson, mais ils peuvent tous nuire à la physiologie du poisson en raison d'interactions directes avec des tissus cibles et non cibles. Une posologie incorrecte est source de mortalité, et cette dernière croît habituellement quand la température augmente (Overton et coll., 2019). Pour ce qui est du stress causé par les différents traitements anti-poux, il est important de tenir compte du fait que le stress aigu du traitement a probablement moins de répercussions que le stress chronique dû à l'infection, comme cela a été montré pour les avermectines (Whyte et coll., 2019, bien que ces produits ne soient plus communs). Néanmoins, il est parfois nécessaire d'administrer des traitements de façon répétée pendant deux à trois semaines en raison de leur inefficacité contre les poux juvéniles, et les effets d'une exposition répétée à certains produits chimiques (par exemple sur le bien-être du poisson et le développement d'une résistance par le pou du poisson) restent un sujet très peu connu dans le champ des thérapies anti-poux.

Les traitements ajoutés à la nourriture ne causent pas de stress supplémentaire au saumon en raison du mode d'application, mais une posologie incorrecte peut être préjudiciable à leur bien-être. Par exemple, une surdose ou un traitement répété à l'ivermectine ont été associés à des modifications de comportement, une perte d'équilibre et une dépigmentation de la peau, ainsi qu'à une neurotoxicité causée par une accumulation dans le cerveau (Palmer et coll., 1987; Johnson et Margolis, 1993; Whyte et coll., 2019). Ces effets n'ont pas été décrits pour l'ivermectine SLICE®.

Les traitements par bain avec bâche ou dans des bateaux-viviers nécessitent l'augmentation des manipulations et de l'entassement. Il est aussi difficile de calculer correctement la posologie en raison de la marge d'erreur considérable dans l'estimation des volumes d'eau fermée (Dobson et Tack, 1991). De plus, il a été montré que les bâches et barrières de cage physiques réduisent significativement la teneur en oxygène (<50 %) dans les cas sans supplément d'oxygène (Stien et coll., 2012) et que le chargement dans les bateaux-citernes augmente le stress aigu (en raison de changements des taux de cortisol plasmatique, de glucose et des niveaux de lactate) avec, dans la plupart des cas, un retour au niveau de stress de référence après de courtes périodes (soit la durée du transport, qui varie de 4 à 40 heures) et cause un stress mineur pendant le déchargement (Iversen et coll., 2005). Dans certains cas, la nature chronophage de l'installation des bâches peut aussi causer du stress et diminuer la qualité de l'eau (par la diminution de la circulation et de l'aération de l'eau, des réductions de la teneur en O₂, etc.) et a entraîné des durées de traitement restreintes (à savoir une exposition de 30 min au maximum) dans certaines zones ou à certaines périodes de l'année (Gautam et coll., 2017). Les organophosphates (par exemple azamethiphos, dichlorvos) peuvent causer une neurotoxicité en réduisant les concentrations de cholinestérase dans le cerveau du poisson en cas de temps de rétablissement

insuffisant entre les traitements (par exemple Raverty, 1987; Roth et Richards, 1992). L'azamethiphos cause des lésions hépatiques chroniques chez la truite arc-en-ciel par l'accumulation de fer due à des traitements répétés (Barisic et coll., 2019). Les bains de peroxyde d'hydrogène peuvent augmenter les concentrations de cortisol plasmatique et de glucose et causer des altérations mineures des concentrations d'ions dans le plasma (sodium, chlorure et potassium), probablement associées à des modifications de la morphologie des branchies et de la peau (Bowers et coll., 2002; M. Fast observations personnelles). Toutefois, selon Bowers et coll. (2002), après toutes les modifications liées au peroxyde d'hydrogène, on constate un retour à la normale dans les 24 heures suivant le traitement par bain. Par ailleurs, la toxicité chronique sublétales du peroxyde d'hydrogène observée chez le saumon de l'Atlantique laisse supposer que les effets sont plus importants quand les traitements par bain sont administrés dans la première moitié de la journée que dans le reste de la journée (Vera et Migaud, 2016). Il est aussi probable que des problèmes de santé antérieurs au bain (par exemple maladie amibienne des branchies) ou la qualité médiocre de l'eau aient des effets synergiques avec certains traitements par bain, qui aggravent les effets nuisibles (entraînant notamment une mortalité élevée; Noble et coll., 2018) par rapport à la situation de poissons en bon état placés dans une eau de qualité adéquate.

3.4.3 Méthodes d'épouillage et barrières mécaniques anti-poux du poisson

On peut réduire les contacts avec le pou du poisson et le taux d'infection chez le saumon de l'Atlantique au moyen de parcs en filet profonds et d'un éclairage submergé, qui attire le poisson vers les profondeurs (Juell et coll., 2003; Stien et coll., 2014; Frenzl et coll., 2014; voir la *section 7 : Éclairage*). Une attention croissante est portée à plusieurs méthodes mécaniques de prévention des contacts avec le pou du poisson ou d'épouillage (Overton et coll., 2019). Ces barrières sont généralement utilisées à l'intérieur des cages flottantes et peuvent produire un milieu clos ou semi-clos. Il s'agit de barrières physiques placées autour des cages (Grøntvedt et coll., 2018; Stien et coll., 2018), de « cages munies d'un cylindre central (dites cages à tuba) de tubes ou de filets » (Oppedal et coll., 2017; Wright et coll., 2017; Geitung et coll., 2019) et de systèmes d'alimentation en eau profonde (Frenzl et coll., 2014). Les barrières anti-poux peuvent empêcher la circulation de l'eau et les échanges, ce qui est susceptible de compromettre la qualité de l'eau et d'augmenter le stress ou la sensibilité aux pathogènes. Des études à petite échelle sur les cages à cylindre central n'ont pas constaté de problème de bien-être et les récentes études à grande échelle commerciales n'ont pas cherché à examiner les effets possibles sur le bien-être à une échelle commerciale (Noble et coll., 2018; Geitung et coll., 2019).

Il existe aussi des dispositifs d'épouillage comme « l'Hydrolicer » et « l'Optilicer » qui nécessitent de pomper le poisson dans un système de jet pulvérisé à haute pression qui élimine les poux. Dans certains cas, ils sont employés avec des caméras qui comptent ou identifient les poux du poisson et de dispositifs d'élimination des poux au laser qui émettent des photons concentrés pour tuer ou blesser les poux identifiés. Comme la plupart sont des systèmes brevetés en cours de mise au point sous différents noms de marques déposées, il existe actuellement peu d'études indépendantes évaluant leur efficacité, leur viabilité économique (Brakstad et Matanovic, 2017; Brakstad et coll., 2019; Bui et coll., 2020a), ou leurs incidences sur le bien-être des poissons. De plus, l'efficacité de ces dispositifs n'a pas été examinée dans la grande variété de conditions qu'on trouve dans les piscicultures (c'est-à-dire dans des sites à densité élevée de plancton et de salissures marines ou des conditions de faible teneur en oxygène nécessitant une supplémentation). L'Hydrolicer et les technologies similaires nécessitent d'entasser les poissons

avant traitement (Overton et coll., 2019), ce qui peut induire une réponse à un stress aigu. Une enquête d'Hjeltnes et coll. (2018) montre que les pisciculteurs déclarent couramment des pertes d'écaïlle et des poissons morts et qu'on observe un saignement des branchies et des blessures au moins pendant la phase de mise au point mettant à l'essai les traitements mécaniques. Overton et coll. (2019) indiquent que les poissons non compromis (définis comme des poissons provenant de groupes à faible mortalité [$<0,25\%$] le mois précédant le traitement) sont plus susceptibles de sortir intacts des dispositifs d'épouillage mécanique, alors que les petits poissons compromis (définis comme des poissons provenant de groupes à mortalité élevée [$0,25$ à 1%] le mois précédant le traitement, ce qui indiquerait la présence d'une maladie ou d'autres facteurs de stress) peuvent présenter une mortalité plus grande si les températures sont trop hautes pendant le traitement ($\sim 10-16\text{ }^{\circ}\text{C}$; Overton et coll., 2019).

Comme l'indique la *section 3.2 : Biologie et cycle biologique du pou du poisson*, une température de l'eau de mer supérieure à $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ met en danger la survie du pou du poisson adulte. C'est pourquoi l'exposition des poissons infectés à des températures nettement plus élevées a été proposée, et utilisée, comme méthode de traitement anti-poux du poisson. Cependant, Poppe et coll. (2018) ont avancé que les températures de l'épouillage thermique (28 à $34\text{ }^{\circ}\text{C}$) sont probablement nocives pour le poisson. L'exposition à des températures $>28\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant une durée ≤ 5 minutes provoque des réactions de panique et des comportements indiquant une nociception (Nilsson et coll., 2019) et il est probable que les poissons s'auto-infligent des dommages graves pendant cette exposition. Gismervik et coll. (2019) montrent aussi que le saumon exposé à une eau entre 34 et $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant 72 à 140 secondes risque des brûlures graves de ses branchies, yeux et cerveau, ainsi que la mort en 2 min (Nilsson et coll., 2019).

Il est important de rappeler que les traitements mécaniques n'apportent pas de protection durable contre les infections par le pou du poisson et qu'il faut donc les répéter pour maîtriser les niveaux d'infection, et ainsi exposer le poisson à un stress aigu répété et à de possibles dommages physiques dus à la manipulation ou au traitement. Noble et coll. (2012) avancent que l'isavirus, les virus hivernaux et *Piscirickettsia salmonis* peuvent coloniser des sites de lésion cutanée en milieu marin, tandis que les infections à *Saprolegnia* spp. sont plus probables en eau douce. Noble et coll. (2018) rapportent aussi une mortalité élevée chez les poissons ayant des problèmes de santé antérieurs (comme la maladie amibienne des branchies) pendant les traitements mécaniques ou thermiques, ainsi que des effets secondaires sur le cerveau et une hémorragie des yeux en raison d'un comportement de panique et de blessures traumatiques pendant le traitement. Les données sur le nombre de traitements nécessaires par cycle de production sont peu nombreuses, mais une simulation réalisée par Kragestein et coll. (2019) estime que, pour 3 exploitations féroïennes situées à proximité et ayant un seuil de traitement de 2 poux gravides/saumon, 3 à 4 traitements (ayant chacun une efficacité de 95%) sont réalisés par cycle de production de 500 jours, bien que le nombre de traitements puisse être nettement plus grand selon le lieu de la cage ou le seuil de traitement. Overton et coll. (2019) signalent un virage entre 2012 et 2017, avec le passage de traitements par agents chimiothérapeutiques à des techniques non médicinales, mais nos connaissances des effets de ces nouveaux traitements sur le bien-être du poisson sont limitées.

3.4.4 Lutte biologique au moyen de poissons nettoyeurs

Plusieurs espèces de poissons nettoyeurs ont montré leur efficacité dans la lutte contre le pou du poisson. Leur utilisation est de plus en plus prise en compte comme solution biologique de substitution aux traitements chimiques et aux technologies coûteuses. Dans les élevages de saumon de l'Atlantique, l'espèce la plus efficace en Europe est la vieille commune (*Labrus bergylta*) et la plus courante aujourd'hui est la lompe (*Cyclopterus lumpus*; Cerbule, 2018). La répartition naturelle de la majorité des espèces de poissons nettoyeurs chevauche celle des salmonidés marins (Pampoulie et coll., 2014; Groner et coll., 2016). Cependant, en raison de la sensibilité à la température de la vieille commune, les travaux les plus récents ont montré qu'en eau froide, la lompe est une solution efficace d'élimination biologique des poux (Immsland et coll., 2014, 2015, 2018). Des préoccupations ont été soulevées sur le fait que les poissons nettoyeurs entreposés pourraient être infectés par le pou du poisson, et que leur réutilisation pendant plusieurs années consécutives exposerait de nouveau les saumons et serait donc déconseillée (Gonzalez et DeBoer, 2017). De plus, de nouvelles données semblent indiquer que les poissons nettoyeurs joueraient un rôle dans la transmission d'agents pathogènes entre salmonidés (par exemple *Tenacibaculum maritimum*, Småge et coll., 2016, et d'autres agents pathogènes examinés dans Treasurer, 2002). Il faudrait des études supplémentaires pour déterminer si les poissons nettoyeurs sont les hôtes finaux ou des vecteurs potentiels de ces agents pathogènes.

Le bien-être des poissons nettoyeurs est également préoccupant, mais ce n'est pas l'objet de notre étude.

3.4.5 Méthodes différentes et nouvelles de lutte contre le pou du poisson

Plusieurs autres techniques de lutte contre l'infection par le pou du poisson sont à l'étude, notamment le recours à une faible salinité et l'élevage de sélection ainsi que des plans de lutte antiparasitaire intégrée.

Parce qu'il a été observé que les taux d'infection par le pou du poisson sont plus bas en cas de faible salinité (Jones et Hargreaves, 2007), que les poissons infectés retournaient parfois dans des eaux saumâtres et douces (Wells et coll., 2007; Birkeland, 1996; Revie et coll., 2003), et que les poissons qui reviennent frayer en eau douce étaient reconnus comme étant récemment remontés par la présence de poux du poisson et comme étant remontés depuis longtemps par l'absence de poux du poisson (Costello, 2009; Connors et coll., 2008), on a supposé qu'une faible salinité était susceptible de réduire l'infection par les poux (Gjelland et coll., 2014). De même, les saumons d'élevage présentent un nombre inférieur de poux dans les zones à faible salinité (Jones et coll., 2007; Revie et coll., 2003; Heuch, 1995). De plus, Elmoslemany et coll. (2015) ont observé une possible sélectivité des espèces de parasites copépodes causée par la tolérance à la salinité – en effet, une prévalence très basse de *C. clemensii* sur les saumons a été constatée dans le bras Muchalat par rapport à celle de *L. salmonis oncorhynchii*, tandis que d'autres régions d'aquaculture présentaient une infection plus mixte – et ils ont associé cet état de fait à la faible salinité de la zone. Il a aussi été observé que la prévalence de *Caligus elongatus* était significativement moins élevée à basse température et faible salinité (Heuch, 1995) et qu'elle variait chez différentes familles de *L. salmonis salmonis*, selon la sensibilité à la température et à la salinité (Ljungfeldt et coll., 2017). En effet, des observations de poux laissent penser qu'ils éviteraient activement les eaux dont la salinité est supérieure à 20 ‰ (Heuch, 1995; Crosbie et coll., 2019). En général, en cas de salinité inférieure à ~26 ‰, le nombre de poux du poisson sur le saumon diminue progressivement à mesure que la salinité décroît ou que le temps

d'exposition croît, ce qui indiquerait que l'hyposalinité constituerait un traitement efficace contre les poux en contexte d'élevage (Sievers et coll., 2019). Pour l'heure, on ne dispose pas de données montrant que le transfert d'adultes marins dans l'eau douce nuit à leur bien-être, mais peu d'études ont été réalisées sur le sujet.

Différentes initiatives ont été prises : sélection des espèces aux fins de résistance au pou, modulation du système immunitaire des poissons par la nutrition et mise au point de vaccins contre le pou du poisson. Gjerde et coll. (2011) et Robledo et coll. (2019) ont montré que le saumon de l'Atlantique présentait une héritabilité moyenne pour ce qui est du nombre de poux par poisson pour *L. salmonis* et *C. rogercresseyi*, respectivement. Bien que les sociétés SalmoBreed et AquaGen proposent des poissons prétendument résistants au pou et qu'il existe un intérêt mondial croissant pour la définition des traits de résistance par des programmes étudiant différents stocks de géniteurs, leur efficacité n'a pas été démontrée par des études scientifiques des applications dans l'industrie. De petits progrès ont été réalisés depuis Raynard et coll. (2002) sur les prototypes de vaccins contre le pou du poisson (Carpio et coll., 2011). Ces stratégies d'intervention ainsi que les aliments fonctionnels anti-poux confèrent toutefois considérablement moins de protection que les méthodes actuelles de contrôle et de traitement décrites plus haut.

Selon de nouvelles données, l'utilisation simultanée de plusieurs méthodes de lutte contre le pou du poisson donnerait de bons résultats (par exemple poisson-nettoyeur, traitement chimique ajouté à l'alimentation et éclairage en eau profonde; Bui et coll., 2020b). Cependant, les effets des différentes combinaisons de traitement sur le bien-être n'ont pas encore été étudiés en profondeur. Les plans de lutte intégrée, qui déterminent les mesures de lutte contre le pou du poisson à partir de la biologie du pou du poisson, de la dynamique de l'infection ainsi que de facteurs environnementaux de la pisciculture, semblent très prometteurs, mais doivent faire l'objet de recherches plus poussées (par exemple Brooks, 2009).

3.5 Références

Aaen, S.M., K.O. Helgesen, M.J. Bakke, K. Kaur et T.E. Horsberg (2015). Drug resistance in sea lice: a threat to salmonid aquaculture, *Trends in Parasitology*, vol. 31(2), p. 72-81.

Abolofia, J., J.E. Wilen et F. Asche (2017). The cost of lice: Quantifying the impacts of parasitic sea lice on farmed salmon, *Marine Resource Economics*, vol. 32, p. 329-349.

Barker, S.E., I.R. Bricknell, J. Covello, S. Purcell, M.D. Fast, W. Wolters et D.A. Bouchard (2019). Sea lice, *Lepeophtheirus salmonis* (Krøyer 1837), infected Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) are more susceptible to infectious salmon anemia virus, *PLoS ONE*, vol. 14(1), n° e0209178.

Barisic, J., S. Cannon et B. Quinn (2019). Cumulative impact of anti-sea lice treatment (azamethiphos) on health status of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*, Walbaum 1792) in aquaculture, *Scientific Reports*, vol. 9, p. 1-13.

Birkeland, K. (1996). Consequences of premature return by sea trout (*Salmo trutta*) infested with the salmon louse (*Lepeophtheirus salmonis* Kroyer): Migration, growth, and mortality, *Canadian Journal of Aquatic Sciences*, vol. 53, p. 2808-2813.

- Bowers, J.M., D.J. Speare et J.F. Burka (2002). The effects of hydrogen peroxide on the stress response of Atlantic salmon (*Salmo salar*), *Journal of Veterinary Pharmacology and Therapeutics*, vol. 25(4), p. 311-313.
- Brakstad, O.M. et D. Matanovic (2017). Optimal Investment Strategy in Lice-Fighting Technologies, thèse de maîtrise en sciences, Département d'économie industrielle et de gestion des technologies, Université norvégienne de sciences et de technologie, Trondheim, Norvège.
- Brakstad, O.M., V. Hagspiel, M.N. Lavrutich et D. Matanovic (2019). Optimal investment decisions in lice-fighting technologies: A case study in Norway, *Aquaculture*, vol. 504, p. 300-313.
- Brauner, C.J., M. Sackville, Z. Gallagher, S. Tang, L. Nendick et A.P. Farrell (2012). Physiological consequences of the salmon louse (*Lepeophtheirus salmonis*) on juvenile pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*): implications for wild salmon ecology and management, and for salmon aquaculture, *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 367, p. 1770-1779.
- Bricknell, I.R., S.J. Dalesman, B. O'Shea, C.C. Pert et A.J. Mordue Luntz (2006). Effect of environmental salinity on sea lice *Lepeophtheirus salmonis* settlement success, *Diseases of Aquatic Organisms*, vol. 71, p. 201-212.
- Brooks, K.M. (2009). Considerations in developing an integrated pest management programme for control of sea lice on farmed salmon in Pacific Canadas, *Journal of Fish Diseases*, vol. 32, p. 59-73.
- Bui, S., L. Geitung, F. Oppedal et L.T. Barrett (2020a). Salmon lice survive the straight shooter: A commercial scale sea cage trial of laser delousing, *Preventative Veterinary Medicine*, vol. 181, n° 105063.
- Bui, S., L.H. Stien, J. Nilsson, H. Trengereid et F. Oppedal (2020b). Efficiency and welfare impact of long-term simultaneous in situ management strategies for salmon louse reduction in commercial sea cages, *Aquaculture*, vol. 520:734934.
- Carpio, Y., L. Basabe, J. Acosta, A. Rodríguez, A. Mendoza, A. Lisperger, E. Zamorano, M. González et M. Rivas (2011). Novel gene isolated from *Caligus rogercresseyi*: A promising target for vaccine development against sea lice, *Vaccine*, vol. 29(15), p. 2810-2820.
- Cerbule, K. (2018). Salmon lice (*Lepeophtheirus salmonis*) control method effectiveness in Atlantic salmon (*Salmo salar*) aquaculture: A systematic literature review, Thèse de maîtrise en sciences, Tromsø, Norvège, Université arctique de Norvège.
- Connors, B.M., E. Juarez-Colunga et L.M. Dill (2008). Effects of varying salinities on *Lepeophtheirus salmonis* survival on juvenile pink and chum salmon, *Journal of Fish Biology*, vol. 72, p. 1825-1830.
- Costello, M.J. (2009). The global economic cost of sea lice to the salmonid farming industry, *Journal of Fish Diseases*, vol. 32(1), p. 115-118.

- Crosbie, T., D.W. Wright, F. Oppedal, I.A. Johnsen, F. Samsing et T. Dempster (2019). Effects of step salinity gradients on salmon lice larvae behaviour and dispersal, *Aquaculture Environment Interactions*, vol. 11, p. 181-190.
- Dobson, D.P. et T.J. Tack (1991). Evaluation of dispersion of treatment solutions of dichlorvos from marine salmon pens, *Aquaculture*, vol. 95, p. 15-32.
- Elmoslemany, A., C.W. Revie, B. Milligan, L. Stewardson et R. Vanderstichel (2015). Wild juvenile salmonids in Muchalat Inlet, British Columbia, Canada: factors associated with sea lice prevalence, *Diseases of Aquatic Organisms*, vol. 117, p. 107-120.
- Fast, M.D. (2014). Fish immune responses to parasitic copepod (namely sea lice) infection, *Developmental and Comparative Immunology*, vol. 43(2), p. 300-312.
- Fast, M.D. et S. Dalvin (à paraître). Sea Lice (*Lepeophtheirus salmonis*), dans Woo, P.T.K., K. Buchmann et J.A. Leong (dir.). *Climate Change and Infectious Diseases*, CABI Publishing, Royaume-Uni.
- Figueroa, C., P. Bustos, D. Torrealba, B. Dixon, C. Soto, P. Conejeros et J.A. Gallardo (2017). Coinfection takes its toll: Sea lice override the protective effects of vaccination against a bacterial pathogen in Atlantic salmon, *Scientific Reports*, vol. 7, n° 17817.
- Fjelldal, P.G., T.J. Hansen, O. Karlsen et D.W. Wright (2019). Effects of laboratory salmon louse infection on Arctic char osmoregulation, growth and survival, *Conservation Physiology*, vol. 7(1), n° coz072.
- Frenzl, B., L.H. Stien, D. Cockerill, F. Oppedal, R.H. Richards, A.P Shinn, J.E. Bron et H. Migaud (2014). Manipulation of farmed Atlantic salmon swimming behaviour through the adjustment of lighting and feeding regimes as a tool for salmon lice control, *Aquaculture*, vol. 424-425, p. 183-188.
- Gautam, R., R. Vanderstichel, A.S. Boerlage, C.W. Revie et K.L. Hammell (2017). Effect of timing of count events on estimates of sea lice abundance and interpretation of effectiveness following bath treatments, *Journal of Fish Diseases*, vol. 40(3), p. 367-375.
- Geitung, L., F. Oppedal, L.H. Stien, T. Dempster, E. Karlsbakk, V. Nola et D.W. Wright (2019). Snorkel sea-cage technology decreases salmon louse infestation by 75% in a full-cycle commercial test, *International Journal for Parasitology*, vol. 49(110), p. 843-846.
- Gismervik, K., S.K. Gåsnes, J. Gua, L.H. Stien, A. Madarob et J. Nilsson (2019). Thermal injuries in Atlantic salmon in a pilot laboratory trial, *Veterinary and Animal Science*, vol. 8, n° 100081.
- Gjelland, K.Ø., R.M. Serra-Llinares, R.D. Hedger, P. Arechavala-Lopez, R. Nilsen, B. Finstad, I. Uglem, O.T. Skilbrei et P.A. Bjørn (2014). Effects of salmon lice infection on the behaviour of sea trout in the marine phase, *Aquaculture Environment Interactions*, vol. 5, p. 221-233.
- Gjerde, B., J. Ødergård et I. Thorland (2011). Estimates of genetic variation in the susceptibility of Atlantic salmon (*Salmo salar*) to the salmon louse *Lepeophtheirus salmonis*, *Aquaculture*, vol. 314(1-4), p. 66-72.

- González, L. et J. Carvajal (2003). Life cycle of *Caligus rogercresseyi*, (Copepoda: Caligidae) parasite of Chilean reared salmonids, *Aquaculture*, vol. 220, p. 101-117.
- Gonzalez, E.B. et F. DeBoer (2017). The development of the Norwegian wrasse fishery and the use of wrasses as cleaner fish in the salmon aquaculture industry, *Fisheries Science*, vol. 83, p. 661-670.
- Grant, A.N. (2002). Medicines for sea lice, *Pest Management Science*, vol. 58(6), p. 521-527.
- Grimnes, A. et P.J. Jakobsen (1996). The physiological effects of salmon lice infection on post-smolt of Atlantic salmon, *Journal of Fish Biology*, vol. 48, p. 1179-1194.
- Groner, M.L., L.A. Rogers, A.W. Bateman, B.M. Connors, L.N. Frazer, S.C. Godwin, M. Krkošek, M.A. Lewis, S.J. Peacock, E.E. Rees, C.W. Revie et U.E. Schlägel (2016). Lessons from sea louse and salmon epidemiology, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 371(1689), n° 20150203.
- Grøntvedt, R.N., A.B. Kristoffersen et P.A. Jansen (2018). Reduced exposure of farmed salmon to salmon louse (*Lepeophtheirus salmonis* L.) infestation by use of plankton nets: estimating the shielding effect, *Aquaculture*, vol. 495, p. 865-872.
- Hamre, L.A., S. Bui, F. Oppedal, R. Skern-Mauritzen et S. Dalvin (2019). Development of the salmon louse *Lepeophtheirus salmonis* parasitic stages in temperatures ranging from 3 to 24°C, *Aquaculture Environment Interactions*, vol. 11, p. 429-443.
- Hamre, L.A., C. Eichner, C.M.A. Caipang, S.T. Dalvin, J.E. Bron, F. Nilsen, G. Boxshall et R. Skern-Mauritzen (2013). The salmon louse *Lepeophtheirus salmonis* (Copepoda: Caligidae) life cycle has only two chalimus stages, *PLoS ONE*, vol. 8(9), n° e73539.
- Heggland, E.I. (2020). Hematophagy in the salmon louse (*Lepeophtheirus salmonis*), thèse de doctorat, Bergen, Norvège, Université de Bergen.
- Hemmingsen, W., K. MacKenzie, K. Sagerup, M. Remen, K. Bloch-Hansen et A. Dagbjartarson Imsland (2020). *Caligus elongatus* and other sea lice of the genus *Caligus* as parasites of farmed salmonids: a review, *Aquaculture*, vol. 522, n° 735160.
- Heuch, P.A. (1995). Experimental evidence for aggregation of salmon louse copepodids (*Lepeophtheirus salmonis*) in step salinity gradients, *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, vol. 75, p. 927-939.
- Heuch, P.A., G. Gettinby et C.W. Revie (2011). Counting sea lice on Atlantic salmon farms – empirical and theoretical observations, *Aquaculture*, vol. 320, p. 149-153.
- Hjeltnes, B., B. Bang-Jensen, G. Bornø, A. Haukaas et C.S. Walde (2019). The Health Situation in Norwegian Aquaculture 2018, Institut vétérinaire norvégien, Oslo, Norvège.
- Hjeltnes, B., B. Bang-Jensen, G. Bornø, A. Haukaas et C.S. Walde (2018). The Health Situation in Norwegian Aquaculture 2017, Institut vétérinaire norvégien, Oslo, Norvège.
- Hogans, W.E. et D.J. Trudeau (1989). Preliminary studies on the biology of sea lice, *Caligus elongatus*, *Caligus curtus*, and *Lepeophtheirus salmonis* (Copepoda: Caligidae) parasitic on

cage-cultured salmonids in the lower Bay of Fundy, *Rapports techniques canadiens des sciences halieutiques et aquatiques*, vol. 1715.

Imsland, A.K., P. Reynolds, G. Eliassen, T.A. Hangstad, A. Foss, E. Vikingstad et T.A. Elvegård (2014). The use of lumpfish (*Cyclopterus lumpus L.*) to control sea lice (*Lepeophtheirus salmonis Krøyer*) infestations in intensively farmed Atlantic salmon (*Salmo salar L.*), *Aquaculture*, vol. 425-426, p. 18-23.

Imsland, A.K., P. Reynolds, G. Eliassen, T.A. Hangstad, A.V. Nytrø, A. Foss, E. Vikingstad et T.A. Elvegård (2015). Feeding preferences of lumpfish (*Cyclopterus lumpus L.*) maintained in open net-pens with Atlantic salmon (*Salmo salar L.*), *Aquaculture*, vol. 436, p. 47-51.

Imsland, A.K.D., A. Hanssen, A.V. Nytrø, P. Reynolds, T.M. Jonassen, T.A. Hangstad, T.A. Elvegård, T.C. Urskog et B. Mikalsen (2018). It works! Lumpfish can significantly lower sea lice infestation in large-scale salmon farming, *Biology Open*, vol. 7, n° bio036301.

Iversen, M., B. Finstad, R.S. McKinley, R.A. Eliassen, K.T. Carlsen et T. Evjen (2005). Stress responses in Atlantic salmon (*Salmo salar L.*) smolts during commercial well boat transports, and effects on survival after transfer to sea, *Aquaculture*, vol. 243(1-4), p. 373-382.

Johnson, S.C. et Fast, M.D. (2004). Interactions between sea lice and their hosts, dans Wiegertjes, G.F. et G. Flik (dir.). *Host-Parasite Interactions*, BIOS Scientific Publishers Ltd, Oxfordshire, Royaume-Uni.

Johnson, S.C. et L. Margolis (1993). Efficacy of ivermectin for control of the salmon louse *Lepeophtheirus salmonis* on Atlantic salmon, *Diseases of Aquatic Organisms*, vol. 17, p. 101-105.

Jones, S.R.M. et N.B. Hargreaves (2007). The abundance and distribution of *Lepeophtheirus salmonis* (Copepoda: caligidae) on pink (*Oncorhynchus gorbuscha*) and chum (*O. keta*) salmon in coastal British Columbia, *Journal of Parasitology*, vol. 93, p. 1324-1331.

Jones, S. et S. Johnson (2015). Biologie du pou du poisson *Lepeophtheirus salmonis* et des espèces du genre *Caligus* dans l'ouest et l'est du Canada, MPO, Document de recherche du Secrétariat canadien de consultation scientifique 2014/019.

Juell, J.E., F. Oppedal, K. Boxaspen et G.L. Taranger (2003). Submerged light increases swimming depth and reduces fish density of Atlantic salmon *Salmo salar L.* in production cages, *Aquaculture Research*, vol. 34, p. 469-477.

Kabata, Z. (1988). Copepoda and Branchiura, dans Margolis, L. et Z. Kabata (dir.). *Guide to the Parasites of Fishes of Canada. Part II – Crustacea*, Publication spéciale canadienne des sciences halieutiques et aquatiques, Pêches et Océans Canada, Ottawa, Canada, p. 3-127.

Kragesteen, T.J., K. Simonsen, W. Andre, A.W. Visser et K.H. Andersen (2019). Optimal salmon lice treatment threshold and tragedy of the commons in salmon farm networks, *Aquaculture*, vol. 512, n° 734329.

Ljungfeldt, L.E.R., M. Quintela, F. Nilsen et K.A. Glover (2017). A pedigree-based experiment reveals variation in salinity and thermal tolerance in the salmon louse, *Lepeophtheirus salmonis*, *Evolutionary Applications*, vol. 10(10), p. 1007-1019.

- Long, A., K.A. Garver et S.R.M. Jones (2019). Synergistic osmoregulatory dysfunction during salmon lice (*Lepeophtheirus salmonis*) and infectious hematopoietic necrosis virus co-infection in sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) smolts, *Journal of Fish Disease*, vol. 42(6), p. 869-882.
- Montory, J.A., J.P. Cumillaf, V.M. Cubillos, K. Paschke, M.A. Urbina et P. Gebauer (2018). Early development of the ectoparasite *Caligus rogercresseyi* under combined salinity and temperature gradients, *Aquaculture*, vol. 486, p. 68-74.
- Mustafa, A., D.J. Speare, J. Daley, G.A. Conboy et J.F. Burka (2000). Enhanced susceptibility of seawater cultured rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum), to the microsporidian *Loma salmonae* during a primary infection with the sea louse, *Lepeophtheirus salmonis*, *Journal of Fish Diseases*, vol. 23(5), p. 337-341.
- Nilsson J., L. Moltumyr, A. Madaro, T.S. Kirstiansen, S.K. Gåsnes, C.M. Mejdell, K. Gismervik, L.H. Stien (2019). Sudden exposure to warm water causes instant behavioural responses indicative of nociception or pain in Atlantic salmon, *Veterinary and Animal Science*, vol. 8, n° 100076.
- Noble, C., H.A. Cañon Jones, B. Damsgård, M.J. Flood, K.Ø. Midling, A. Roque, B.S. Sæther et S.Y. Cottee (2012). Injuries and deformities in fish: their potential impacts upon aquacultural production and welfare, *Fish Physiology and Biochemistry*, vol. 38(1), p. 61-83.
- Noble, C., K. Gismervik, M.H. Iversen, J. Kolarevic, J. Nilsson, L.H. Stien et J.F. Turnbull (dir.) (2018). Welfare Indicators for farmed Atlantic salmon: tools for assessing fish welfare, Norvège, Nofima.
- Nolan, D.T., P. Reilly et S.E.W. Bonga (1999). Infection with low numbers of the sea louse *Lepeophtheirus salmonis* induces stress-related effects in postsmolt Atlantic salmon (*Salmo salar*), *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 56(6), p. 947-959.
- Oelckers, K., S. Vike, H. Duesund, J. Gonzalez, A. Nylund et G. Yany (2014). *Caligus rogercresseyi*: possible vector in the horizontal transmission of the virus of infectious salmon anaemia (ISAv), *Latin American Journal of Aquatic Research*, vol. 43(2), p. 380-387.
- Oppedal, F., F. Samsing, T. Dempster, D.W. Wright, S. Bui et L.H. Stien (2017). Sea lice infestation levels decrease with deeper 'snorkel' barriers in Atlantic salmon sea-cages, *Pest Management Science*, vol. 73(9), p. 1935-1943.
- Overton, K., T. Dempster, F. Oppedal, T.S. Kristiansen, K. Gismervik et L.H. Stien (2019). Salmon lice treatments and salmon mortality in Norwegian aquaculture: a review, *Reviews in Aquaculture*, vol. 11, p. 1398-1417.
- Palmer, R., H. Rodger, E. Drinan, C. Dwyer et P.R. Smith (1987). Preliminary trials on the efficacy of ivermectin against parasitic copepods of Atlantic salmon, *Bulletin of the European Association of Fish Pathologists*, vol. 7(2), p. 47-54.
- Pampoulie, C., S. Skirnisdottir, G. Olafsdottir, S.J. Helyar, V. Thorsteinsson, S.P. Jónsson, A. Fréchet, C.M.F. Durif, S. Sherman et M. Lampart-Kałuzniacka (2014). Genetic structure of the lumpfish *Cyclopterus lumpus* across the North Atlantic, *ICES Journal of Marine Science*, vol. 71, p. 2390-2397.

Poppe, T.T., A.S. Dalum, E. Røislien, J. Nordgreen et K.O. Helgesen (2018). Termisk behandling av laks (Thermal treatment of salmon), *Norsk veterinærtidsskrift*, vol. 3, p. 148-156.

Raverty, S.A. (1987). Epidemiology of the salmon louse, *Lepeophtheirus salmonis*, on Booker McConnell farm sites and the clinicopathology and enzymology of repetitive NUVAN EC 500 treatments in *Salmo salar*, thèse de maîtrise en sciences, Stirling, Royaume-Uni, Université de Stirling.

Raynard, R.S., I.R. Bricknell, P.F. Billingsley, A.J. Nisbet, A. Vigneau et C. Sommerville (2002). Development of vaccines against sea lice, *Pest Management Science*, vol. 53(6), p. 569-575.

Revie, C.W., G. Gettinby, J.W. Treasurer et C. Wallace (2003). Identifying epidemiological factors affecting sea lice *Lepeophtheirus salmonis* abundance on Scottish salmon farms using general linear models, *Diseases of Aquatic Organisms*, vol. 57, p. 85-95.

Robledo, D., A.P. Guitierrez, A. Barría, J.P. Lhorente, R.D. Houston et J.M. Yañez (2019). Discovery and functional annotation of quantitative trait loci affecting resistance to sea lice in Atlantic salmon, *Frontiers in Genetics*, vol. 10, p. 1-10.

Roth, M. et R.H. Richards (1992). Trials on the efficacy on azamethiphos and its safety to salmon for the control of sea lice, dans Michel, C. et D.J. Alderman (dir.), *Chemotherapy in Aquaculture: From Theory to Reality*, Office international des épizooties, Paris, France.

Samsing, F., F. Oppedal, S. Dalvin, I. Johnsen, T. Vagseth et T. Dempster (2016). Salmon lice (*Lepeophtheirus salmonis*) development times, body size, and reproductive outputs follow universal models of temperature dependence, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 73, p. 1841-1851.

Sievers, M., F. Oppedal, E. Ditria et D.W. Wright (2019). The effectiveness of hyposaline treatments against host-attached salmon lice, *Scientific Reports*, vol. 9, n° 6976.

Småge, S.B., K. Frisch, O.J. Brevik, K. Watanabe et A. Nylund (2016). First isolation, identification and characterisation of *Tenacibaculum maritimum* in Norway, isolated from diseased farmed sea lice cleaner fish *Cycolpterus lumpus* L, *Aquaculture*, vol. 464, p. 178-184.

Stien, L.H., M. Bracke, O. Folkedal, J. Nilsson, F. Oppedal, T. Torgersen, S. Kittilsen, P. J. Midtlyng, M.A. Vindas, Ø. Øverli et T.S. Kristiansen (2013). Salmon Welfare Index Model (SWIM 1.0): a semantic model for overall welfare assessment of caged Atlantic salmon: review of the selected welfare indicators and model presentation, *Reviews in Aquaculture*, vol. 5, p. 33-57.

Stien, L.H., J.E. Fosseidengen, M.E. Malm, H. Sveier, T. Torgersen, D.W. Wright et F. Oppedal (2014). Low intensity light of different colours modifies Atlantic salmon depth use, *Aquacultural Engineering*, vol. 62, p. 42-48.

Stien, L.H., M.B. Lind, F. Oppedal, D.W. Wright et T. Seternes (2018). Skirts on salmon production cages reduced salmon lice infestations without affecting fish welfare, *Aquaculture*, vol. 490, p. 281-287.

Stien, L.H., J. Nilsson, E.M. Hevrøy, F. Oppedal, T.S. Kristiansen, A.M. Lien et O. Folkedal (2012). Skirt around a salmon sea cage to reduce infestation of salmon lice resulted in low oxygen levels, *Aquacultural Engineering*, vol. 51, p. 21-25.

Treasurer, J.W. (2002). A review of potential pathogens of sea lice and the application of cleaner fish in biological control, *Pest Management Science*, vol. 58, p. 546-558.

Vera, L.M. et Migaud, H. (2016). Hydrogen peroxide treatment in Atlantic salmon induces stress and detoxification response in a daily manner, *Chronobiology International*, vol. 33(5), p. 530-542.

Wagner, G.N., M.D. Fast et S.C. Johnson (2008). Physiology and immunology of *Lepeophtheirus salmonis* infections on salmonids, *Trends in Parasitology*, vol. 24, p. 175-182.

Wells, A., C.E. Grierson, L. Marshall, M. MacKenzie, I.J. Russon, H. Reinardy, R. Sivertsgård, P.A. Bjørn, B. Finstad, S.E.W Bonga, C.D. Todd et N. Hazon (2007). Physiological consequences of “premature freshwater return” for wild sea-run brown trout (*Salmo trutta*) postsmolts infested with sea lice (*Lepeophtheirus salmonis*), *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 64, p. 1360-1369.

Whyte, S.K., J.D. Poley, A. Mueller, C. Van Iderstine, K.E. Fitzpatrick, S.L. Purcell, B.F. Koop, S.C. Johnson, S. Wadsworth et M.D. Fast (2019). Avermectin treatment for *Lepeophtheirus salmonis*: Impacts on host (*Salmo salar*) and parasite immunophysiology, *Aquaculture*, vol. 501, p. 488-501.

Wright, D.W., L.H. Stien, T. Dempster, T. Vagseth, V. Nola, J.E. Fosseidengen et F. Oppedal (2017). ‘Snorkel’ lice barrier technology reduced two co-occurring parasites, the salmon louse (*Lepeophtheirus salmonis*) and the amoebic gill diseases causing agent (*Neoparamoeba perurans*), in commercial salmon sea-cages, *Preventative Veterinary Medicine*, vol. 140, p. 97-105.

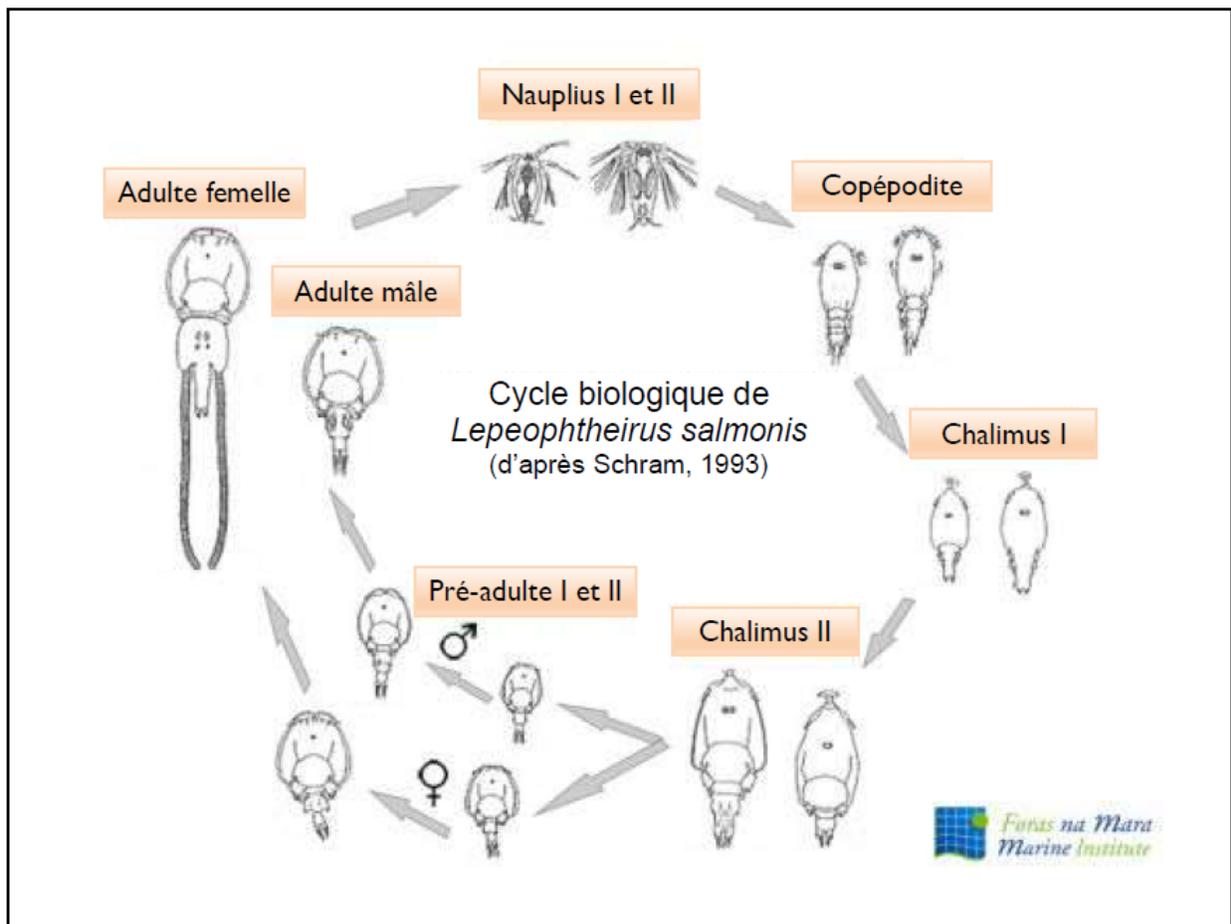


Figure 3.1. Cycle biologique de *L. salmonis*, une espèce commune de pou du poisson infectant le saumon.

Trois stades planctoniques, nauplius I et II muent en copépodes, soit le stade infectieux, et se fixent sur le poisson. Après une mue, le pou passe du stade copépodite aux stades sessiles chalimus I et II, avant de muer au stade pré-adulte auquel il peut se déplacer sur la surface du poisson et est susceptible d'entrer dans la colonne d'eau. Les deux stades pré-adultes sont suivis d'une dernière mue et du stade d'adulte mature. Tiré de Marine Institute, <https://www.marine.ie>.

4 Privation de nourriture

Conclusions :

1. **La privation de nourriture est soit de courte durée, afin que les intestins soient vidés, soit de longue durée, quand le poisson compte sur ses réserves d'énergie. Le taux de clairance/déplétion dépend grandement de la taille corporelle et de la température.**
2. **La privation de courte durée profite au bien-être du poisson avant qu'il soit capturé dans un filet, manipulé, transporté, vacciné, abattu et avant les proliférations phytoplanctoniques massives.**
3. **La privation de nourriture de longue durée peut profiter au bien-être du poisson aux fins de réduction du risque de mortalité causé par les proliférations phytoplanctoniques chroniques et le surrefroidissement hivernal.**
4. **Vers la fin de leur maturation sexuelle, les géniteurs montrent naturellement une perte d'appétit, qui entraîne une privation de nourriture que le pisciculteur ne maîtrise pas.**
5. **La littérature scientifique permet d'estimer relativement correctement les lignes directrices relatives au bien-être concernant la durée courte acceptable de privation de nourriture afin que les intestins soient vidés, sauf pour les grands saumons de l'Atlantique pêchés à une température inférieure à 5 °C.**
6. **Il peut se révéler difficile de définir les lignes directrices relatives au bien-être concernant la longue durée acceptable de privation de nourriture, mais il faut envisager la transition entre l'utilisation des réserves lipidiques et la décomposition des protéines fonctionnelles (inanition du stade 2 au stade 3).**
7. **En cas de restriction de nourriture, les agressions et les hiérarchies de dominance sont susceptibles d'augmenter, ce qui peut porter atteinte aux nageoires (quand les poissons sont privés d'aliments jusqu'à l'inanition), y compris sur de très courtes périodes.**

4.1 Introduction

Le présent chapitre examine la littérature scientifique primaire étudiant les effets de la privation de nourriture sur le poisson et cherche à cerner les questions de bien-être pertinentes. La privation de nourriture de courte durée, destinée à vider le tractus intestinal des salmonidés d'élevage, est une pratique normalisée précédant la capture au filet, le transport et la manipulation connexes à la vaccination et l'abattage. Le fait de vider les intestins apporte des bienfaits en matière de bien-être et de salubrité des aliments : cela diminue le risque d'hypoxie en réduisant le métabolisme pendant la digestion et l'absorption des aliments, diminue les salissures provenant de la rétention d'eau avec des excréments – ce qui est essentiel pendant le transport – et réduit le risque que l'aiguille endommage les organes internes au moment de la vaccination par injection dans la cavité péritonéale. Ici, ces pratiques ne sont pas prises en compte.

La privation de nourriture de longue durée est pratiquée par les pisciculteurs dans quatre situations : (1) avant l'abattage, (2) pendant les proliférations chroniques d'algues nocives, (3) pendant les événements de « surrefroidissement » dans les cages marines du Canada atlantique, et (4) pendant la maturation sexuelle du stock de géniteurs. Ces pratiques susciteraient des préoccupations quant au bien-être. La présente revue de la littérature s'intéresse aussi à des études sur la privation de nourriture destinée à réduire le problème de la maturation sexuelle précoce et améliorer la résistance aux maladies ainsi que la qualité de la chair.

4.2 Aliments, réserves énergétiques, stress causé par l'inanition et réponses comportementales

Les animaux ingèrent les aliments pour couvrir leurs besoins énergétiques et d'autres processus nécessitant des vitamines, des minéraux, etc. Une partie est immédiatement utilisée, une autre sert à la croissance et une dernière est mise en réserve. L'énergie stockée est vitale au maintien de la santé animale en cas de pénurie alimentaire, chose courante pour les poissons sauvages. La demande d'énergie d'un animal est souvent mesurée indirectement par la mesure de la consommation d'oxygène, qui permet d'estimer le taux métabolique standard (taux métabolique minimum avec intestin vidé). La température et la taille corporelle sont deux facteurs dominants du taux métabolique. Les animaux d'élevage à sang chaud ont des demandes d'énergie constamment élevées, c'est pourquoi ils doivent être nourris régulièrement. Notons que les besoins alimentaires des poissons, pour la plupart ectothermes, dépendent de la température, principal facteur déterminant du taux métabolique (Fry, 1971). Au Canada, la zone de tolérance thermique du saumon de l'Atlantique et de la truite arc-en-ciel d'élevage se situe entre 0,1 et 25 °C en eau douce, et entre 0 et 18 °C dans l'eau de mer. En eau douce, la tolérance des espèces *Salvelinus* se situe entre 0,1 et ~23 °C. En général, une baisse de 10 °C double le taux métabolique de nombreuses espèces de poissons (Clarke et Johnston, 1999). Chez tous les animaux, la taille corporelle et le taux métabolique présentent une relation inverse : les grands animaux ont une plus faible demande énergétique par unité de masse corporelle. Chez les poissons, sur une échelle bilogarithmique, la masse corporelle et le taux métabolique standard ont une relation en ligne droite avec une pente de 0,8 (Clarke et Johnston, 1999). Les tables d'alimentation sont conçues à partir de cette relation. Par exemple, un tacon saumon de l'Atlantique de 5 g à 16 °C mange environ 4 % de son poids corporel par jour (pc/j), contre 1,7 % pc/j pour un tacon de 70 g. À titre de comparaison, à 5 °C, la ration est nettement inférieure, soit d'approximativement 1 et 0,25 % pc/j respectivement (Farmer et coll., 1983). Nourrir les poissons conformément aux tables consiste à peu près à leur donner la quantité ingérable maximale et cela produit la croissance somatique la plus élevée possible à une température donnée. La ration d'entretien (c'est-à-dire la quantité d'aliments n'entraînant ni gain ni perte de poids corporel) est de cinq à sept fois inférieure à la ration maximale, ce qui indique la capacité des poissons à réduire leur taux métabolique quand la quantité d'aliments est restreinte.

L'appétit dépend de la plénitude gastrique. Les salmonidés acceptent de la nourriture quand leur estomac est rempli à 85 % ou moins (Talbot et coll., 1984). Le taux d'évacuation intestinale est en grande partie une fonction à la fois de la température et de la taille corporelle (voir la figure 4.1), mais la température semble dominante (voir le tableau 4.1). Selon les données du tableau 4.1, la plupart des salmonidés de moins de 1 kg réalisent l'évacuation intestinale en 15 degrés-jours (Dj). Toutefois, la seule étude portant sur de grands saumons de l'Atlantique de

5 kg à 4 °C – cas typique des conditions de récolte au Canada – constate la présence de fèces dans les sections intestinales après 5 et 6 jours, ce qui laisse supposer qu'il faut 7 jours de privation de nourriture (28 Dj) pour complètement vider les intestins (Waagbø et coll., 2017).

Les intestins des salmonidés d'élevage sont majoritairement remplis la plupart du temps, mais chez les poissons sauvages, l'incidence de poissons aux intestins vides est élevée (Arrington et coll., 2002). Par conséquent, dans les régions tempérées, les poissons ont développé des stratégies leur permettant de survivre pendant de longues périodes sans nourriture (par exemple en hiver) en consommant l'énergie stockée. Les salmonidés sont bien adaptés à l'équilibre entre périodes de privation de nourriture et utilisation de réserves énergétiques avec consommation non fréquente de grandes proies de grande qualité dans la nature (Arrington et coll., 2002). Pour survivre à l'hiver, quand l'appétit et la disponibilité de nourriture sont bas, la mobilisation des lipides stockés est vitale pour les salmonidés sauvages (Hutchings et coll., 1999). En hiver, des salmonidés en eau douce à une température <1 °C ingèrent de petites quantités d'aliments qu'ils soient élevés ou sauvages (Cunjak et Power, 1987), mais leur appétit est très faible, à la limite du jeûne, et le gain de poids est négligeable.

Trois stades d'inanition ont été définis chez le poisson, semblables à ceux des vertébrés supérieurs (Soengas et coll., 1996; Simpkins et coll., 2003; Bar, 2014) :

Stade 1 : les réserves hépatiques de glycogène sont mobilisées afin que soit maintenue la glycémie, car le glucose est crucial pour le système nerveux central. L'activité nataoire et le taux métaboliques sont tous deux réduits.

Stade 2 : les lipides sont mobilisés, par un processus de catabolisme des triglycérides dans les tissus adipeux et la libération d'acides gras libres et de glycérol dans la circulation sanguine. Les acides gras sont ensuite transformés dans le foie en corps cétoniques et circulent comme sources d'énergie pour le cerveau. Le catabolisme des protéines commence, libérant des acides aminés, qui sont catabolisés en acides-cétones et en ammoniac dans le foie, puis utilisés pour la production de glucose par la gluconéogenèse.

Stade 3 : utilisation accrue de protéines, qui compromet la fonction vitale des tissus et conduit à la mort.

Le moment de transition entre les phases varie selon les espèces et dépend fortement de la taille corporelle et de la température (Bar, 2014).

Chez les animaux d'élevage, la perte de poids corporel par jour causée par l'inanition est rapide : poulets 5 %, chèvres en lactation 8 % et porcs 6 % par jour (McCue, 2010). En comparaison, chez des saumons de l'Atlantique de taille commerciale de 5 kg à 4 °C non nourris pendant 12 semaines, la vitesse de la perte de poids est nettement plus lente et diminue progressivement de 0,6 % par jour au jour 7, à 0,23 % par jour au jour 30 et à 0,14 % par jour au jour 86, soit une perte totale de seulement 11 % de leur poids initial après 12 semaines de privation de nourriture (Einen et coll., 1998). Le bien-être du poisson n'a toutefois pas été examiné (Einen et coll., 1998). Le changement de poids corporel du poisson n'est pas toujours un indicateur fiable de l'inanition, étant donné que des pertes de matière organique peuvent être masquées par l'augmentation de la teneur en eau. À titre d'exemple, le poids moyen d'un saumon de l'Atlantique (20-30 g à 14 °C) non nourri pendant 7 à 14 jours reste identique (Soengas et coll.,

1996). Le tacon reste au stade 2 pendant 6 semaines de privation de nourriture et, après 15 jours de prise d'aliments, il restaure complètement ses réserves corporelles (Soengas et coll., 1996). Sur une truite arc-en-ciel non nourrie (50 g; 7,5 °C), la teneur en eau totale du corps passe de 74 à 86 % en 147 jours et est fortement corrélée à une diminution des lipides (Simpkins et coll., 2003). En comparaison, une truite arc-en-ciel (280 g à 6-8 °C) non nourrie pendant 29 jours perd 18 % de son poids corporel moyen alors que les témoins nourris enregistrent une prise de poids de 7 % (Pottinger et coll., 2003).

La teneur en lipides corporelle globale est considérée comme un indicateur utile pour mesurer l'état physiologique des truites non nourries (Simpkins et coll., 2003). Des estimations non létales du tissu adipeux sont réalisables à l'aide d'un adipomètre d'utilisation facile mais coûteux (8 000 CAD; distell.com). En revanche, le cortisol plasmatique, un indicateur établi du stress chez le poisson, semble être peu fiable pour mesurer l'inanition. Chez des truites arc-en-ciel non nourries pendant 6 à 9 semaines dans deux études, le cortisol plasmatique reste basal (<10 ng/ml), identique à celui des témoins alimentés (Sumpter et coll., 1991; Pottinger et coll., 2003).

Dans une autre étude sur des femelles de saumon de l'Atlantique anadromes et férales, Cipriano et coll. (2015) se sont intéressés aux changements du profil des métabolites pendant une période de manque d'appétit de 6 à 7 mois causée par la fraie. Les auteurs n'ont pas trouvé, pendant cette période, de preuve de changement des composés métaboliques qui indiquerait un état catabolique pathologique et ils ont conclu qu'il se pouvait que les poissons n'aient pas subi de stress anormal et qu'ils soient adaptés, à ce stade de leur cycle biologique, à cet état.

La privation de nourriture de l'omble chevalier pendant 18 semaines, qui visait à étudier la relation entre croissance somatique et âge à la maturité sexuelle, a attiré l'attention de vétérinaires et d'éthiciens (Liu et Duston, 2016, avec les réponses d'O'Halloran, 2017, et Rollin, 2018). Les teneurs en protéines du corps entier (16 %) restent inchangées pendant la période de privation et les poissons puisent dans leurs réserves lipidiques, qui diminuent pour passer de 12 à 4 % (Liu et Duston, 2016). Les données indiquent que les poissons sont avancés dans le stade 2 de l'inanition, mais qu'ils n'atteignent pas le stade 3.

L'augmentation des agressions entre salmonidés d'élevage est une conséquence potentielle grave de la privation de nourriture. Il a été montré que l'alimentation à fréquence basse (12 fois/jour) et les distributeurs automatiques de nourriture limitant l'accès aux aliments causent une érosion significative des opercules et des nageoires chez les saumons de l'Atlantique juvéniles (Larsen et coll., 2018). Des truites arc-en-ciel (25 g, 8 °C, 1,8 kg/m³) auxquelles des rations réduites sont proposées développent des hiérarchies de dominance entraînant de plus grandes lésions sur les nageoires dorsales des individus subordonnés (Moutou et coll., 1998). Chez des tacons de saumon de l'Atlantique (60 g, 10 °C, 10 kg/m³), les restrictions alimentaires (à savoir une alimentation ne permettant pas la satiété) pendant seulement 10 jours causent des augmentations significatives des lésions sur les nageoires dorsales (Canon Jones et coll., 2017). Ce type de lésions des nageoires peut produire des infections secondaires et constitue une source de préoccupation importante en matière de bien-être. Les autres facteurs de risque influant sur l'incidence des agressions sont la température, la densité de mise en charge, l'espèce, la souche et même le stade du cycle biologique.

Il se peut que le stress dû à l'inanition augmente la résistance des tacons de saumon de l'Atlantique à la vibriose d'eau froide (Damsgård et coll., 2004), mais ce résultat n'a pas encore été reproduit pour l'espèce. Chez les non-salmonidés, la dorade japonaise (*Pagrus major*) privée de nourriture montre une réponse hépatique significativement plus grande que les témoins alimentés après une exposition à *Edwardsiella tarda*, ce qui indique que le phénomène pourrait être réel, mais que le mécanisme reste inconnu (Mohapatra et coll., 2017).

4.3 Pratiques aquacoles étendant la privation de nourriture à d'autres domaines que l'évacuation intestinale

4.3.1 Privation de nourriture avant l'abattage

La revue de la littérature n'a pas permis de cerner de récentes avancées claires dans la définition des limites acceptables de l'inanition chez les salmonidés d'élevage. C'est pourquoi on présente ici l'examen des lignes directrices relatives au bien-être publiées antérieurement. En 1996, le Farm Animal Welfare Council (Royaume-Uni) a recommandé que les truites arc-en-ciel et les saumons de l'Atlantique puissent être privés de nourriture respectivement pendant 48 et 72 heures au maximum avant l'abattage pour des raisons d'hygiène alimentaire (FAWC, 1996). La justification de ces valeurs n'était pas expliquée, ne s'appuyait pas sur la littérature scientifique disponible à cette date et ignorait la température. Une revue de la littérature réalisée par Ashley (2007) appelait à la réalisation d'études empiriques concernant les effets de la privation de nourriture sur la physiologie du stress et le comportement. L'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA pour European Food Safety Authority) a reconnu que de longues périodes de privation de nourriture sont fréquentes avant l'abattage du saumon de l'Atlantique et admis l'absence de données publiées sur le bien-être du poisson (EFSA, 2008). L'EFSA (2009) a aussi affirmé qu'on ne pouvait simplement déterminer une durée de privation de nourriture, car son incidence sur le bien-être dépendait de la température, de la taille corporelle et des réserves lipidiques. L'Autorité a néanmoins recommandé d'éviter un jeûne de plus de 50 Dj (par exemple 5 jours à 10 °C). Le FAWC (2014) a convenu qu'un jeûne soudain était susceptible d'accroître les agressions et que les périodes de privation en degrés-jours convenaient mieux qu'une durée absolue. Après 56 Dj de privation de nourriture (14 jours à 4 °C), de grands saumons de l'Atlantique (5,6 kg) ne montrent pas d'effets négatifs sur leur niveau général de stress, ni l'immunité, ni la santé, d'après l'analyse d'une série de marqueurs sanitaires, comme l'expression génique, les hormones et les métabolites (Waagbø et coll., 2017). Cette étude rapporte par ailleurs que les intestins se vident en 7 jours (28 Dj).

4.3.2 Proliférations chroniques d'algues nocives

Les proliférations d'algues menacent gravement les salmonidés d'élevage dans les parcs en filet marins de la Colombie-Britannique et elles représentent une menace occasionnelle, mais croissante, dans le Canada atlantique. Les proliférations peuvent causer une mortalité de masse dont les causes sont l'altération physique des branchies, des ichtyotoxines ou une hypoxie. Ailleurs dans le monde, les proliférations ont aussi causé des pertes massives de saumon d'élevage en Europe et au Chili (par exemple Quinones et coll., 2017) et la hausse des températures océaniques aggrave le problème (Gobler et coll., 2017). En Colombie-Britannique, chaque jour, la décision de nourrir le poisson est prise seulement une fois que l'échantillonnage de la colonne d'eau à l'aide d'un filet à plancton est réalisé et que l'espèce et l'abondance des algues sont déterminées (Haigh, 2017). En général, les algues se concentrent relativement près de

la surface, où le taux de photosynthèse est plus élevé. Les saumons restent normalement dans les eaux plus profondes et plus sûres de la cage, mais ils sont attirés à la surface quand des aliments sont proposés, avec un risque de conséquences fatales. Souvent, la privation de nourriture dure quelques heures seulement, mais dans certains cas, elle peut durer des jours ou plusieurs semaines (B. Milligan, communication personnelle).

4.3.3 *Gestion des risques de surrefroidissement*

Le « surrefroidissement » est un terme de l'industrie désignant la mort de salmonidés d'élevage causée par la formation de cristaux de glace dans les tissus quand la température de l'eau de mer est de 0 °C ou moins. Ce phénomène peut poser de graves problèmes dans les parcs en filet des côtes du Canada atlantique (Saunders et coll., 1975; Fletcher et coll., 1988). Le risque de surrefroidissement est plus élevé de fin février au début de mars, quand la température de la mer peut baisser sous le point de congélation des fluides cellulaires, du plasma et d'autres fluides corporels (~-0,6 à -0,8 °C). Dans une eau de mer sous le point de congélation des tissus, le poisson reste vivant dans un état de surrefroidissement (Scholander et coll., 1957). Les électrolytes tissulaires protègent généralement le poisson de la formation de cristaux de glace, qui perturbent les fonctions cellulaires. Toutefois, si les poissons sont surpris pour une raison ou une autre (bruits forts, alimentation, activité humaine, rencontre de glace de surface dans les parcs en filet par exemple), leurs mouvements soudains entraînent la formation rapide de cristaux de glace, par un processus dit de nucléation des cristaux de glace. S'ils ne sont pas dérangés, les poissons en cage restent souvent en profondeur où la température de l'eau peut être légèrement plus élevée qu'à la surface. C'est pourquoi les aquaculteurs ne restent pas sur place et n'alimentent pas les poissons, situation qui peut durer jusqu'à deux semaines ou plus à Terre-Neuve (A. Borhardt, Mowi, communication personnelle).

4.3.4 *Maturation sexuelle*

Chez tous les salmonidés, les derniers stades de la maturation sexuelle sont associés à une perte d'appétit et à la diminution de la masse tissulaire somatique, tandis que les gonades poursuivent leur croissance. Dans le stock de géniteurs, l'arrêt de l'alimentation n'a pas d'effets négatifs sur la qualité des gamètes, mais il est associé à une résistance moindre aux maladies. En revanche, pour les poissons destinés à la production alimentaire, la maturation sexuelle est hautement indésirable. En ce qui concerne le saumon de l'Atlantique élevé en Norvège, en Écosse et dans le Canada atlantique, les poissons en cours de maturation commencent à jeûner et perdre du poids à partir de juin ou juillet et terminent leur maturation sexuelle autour de novembre (Asknes et coll., 1986; Stead et coll., 1999; Duston et Saunders, 1999).

4.3.5 *Température de l'eau élevée*

Les saumons de l'Atlantique élevés en cages marines sont de plus en plus exposés au risque de températures estivales élevées en raison des changements climatiques mondiaux. La mortalité de masse dans un fjord de Terre-Neuve en septembre 2019 est l'incident le plus inquiétant constaté au Canada (CBC News, 2019). En Tasmanie, des saumons de l'Atlantique ont été exposés à une température maximale de l'eau de mer de 22,9 °C et à plus de 110 jours au-dessus de 18 °C (Wade et coll., 2019). Des aliments étaient proposés quotidiennement aux grands poissons (2,4 kg), mais leur appétit diminuait jusqu'à s'éteindre pendant environ deux mois, ce qui a

entraîné une perte d'approximativement 300 g de poids corporel. Les poissons plus petits (1 kg) toléraient mieux les températures élevées : ils ont cessé de se nourrir pendant moins d'une semaine et leur poids corporel est resté stable. La saturation en oxygène était d'environ 85 % (6,5 mg/l pendant toute la période) et aucune mortalité n'a été constatée. Dans une perspective de bien-être, il faut déterminer les sites de cages marines à risque en modélisant les températures de l'eau de mer et des suppléments d'oxygène doivent être disponibles.

4.4 Références

- Aas, T.S., H.J. Sixten, M. Hillestad, H. Sveier, T. Ytrestøyl, B. Bjarne Hatlen et T. Åsgård (2017). Measurement of gastrointestinal passage rate in Atlantic salmon (*Salmo salar*) fed dry or soaked feed, *Aquaculture Reports*, vol. 8, p. 49-57.
- Arrington, D.A., K.O. Winemiller, W.F. Loftus et S. Akin (2002). How often do fishes “run on empty”?, *Ecology*, vol. 83(8), p. 2145-2151.
- Ashley, P.J. (2007). Fish welfare: Current issues in aquaculture, *Applied Animal Behaviour Science*, vol. 104, p. 199-235.
- Asknes, A., B. Gjerde et S.O. Roald (1986). Biological, chemical and organoleptic changes during maturation of farmed Atlantic salmon, *Salmo salar*, *Aquaculture*, vol. 53, p. 7-20.
- Bar, N. (2014). Physiological and hormonal changes during prolonged starvation in fish, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 71, p. 1447-1458.
- Canon Jones, H.A., C. Noble, B. Damsgard et G.P. Pearce (2017). Evaluating the effects of a short-term feed restriction period on the behavior and welfare of Atlantic salmon, *Salmo salar*, parr using social network analysis and fin damage, *Journal of the World Aquaculture Society*, vol. 48, p. 35-44.
- CBC News (2019). Warm water, not sea lice, caused massive salmon die-off, says chief vet, consultable sur <https://www.cbc.ca/news/canada/newfoundland-labrador/warm-water-salmon-die-off-1.5302950>.
- Cipriano, R.C., M.L. Smith, K.A. Vermeersch, A.D.M. Dove et M.P. Styczynski (2015). Differential metabolite levels in response to spawning-induced inappetence in Atlantic salmon *Salmo salar*, *Comparative Biochemistry and Physiology, Part D*, vol. 13, p. 52-59.
- Clarke, A. et N.M. Johnston (1999). Scaling of metabolic rate with body mass and temperature in teleost fish, *Journal of Animal Ecology*, vol. 68, p. 893-905.
- Cunjak, R.A. et G. Power (1987). The feeding and energetics of stream-resident trout in winter, *Journal of Fish Biology*, vol. 31, p. 493-511.
- Damsgård, B., U. Sørum, I. Ugelstad, R.A. Eliassen et A. Mortensen (2004). Effects of feeding regime on susceptibility of Atlantic salmon (*Salmo salar*) to cold water vibriosis, *Aquaculture*, vol. 239, p. 37-46.
- Duston, J. et R.L. Saunders (1999). Effect of winter food deprivation on growth and sexual maturity of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in seawater, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 56, p. 201-207.

EFSA (Autorité européenne de sécurité des aliments) (2008). Animal welfare aspects of husbandry systems for farmed Atlantic salmon, *The EFSA Journal*, vol. 736, p. 1-31.

EFSA (Autorité européenne de sécurité des aliments) (2009). Species-specific welfare aspects of the main systems of stunning and killing of farmed fish: rainbow trout, *The EFSA Journal*, vol. 1013, p. 1-55.

Einen, O., B. Waagan et M.S. Thomassen (1998). Starvation prior to slaughter in Atlantic salmon (*Salmo salar*): I. Effects on weight loss body shape, slaughter- and fillet-yield, proximate and fatty acid composition, *Aquaculture*, vol. 166, p. 85-104.

Elliott, J.M. (1972). Rates of gastric evacuation in brown trout, *Salmo trutta* L., *Freshwater Biology*, vol. 2, p. 1-18.

Farm Animal Welfare Council (FAWC) (1996). *FAWC Report on the Welfare of Farmed Fish*, consultable sur <https://www.gov.uk/government/publications/fawc-report-on-the-welfare-of-farmed-fish>.

Farm Animal Welfare Council (FAWC) (2014). *Opinion on the welfare of farmed fish*, consultable sur <https://www.gov.uk/government/publications/fawc-report-on-the-welfare-of-farmed-fish>.

Farmer, G.J., D. Ashfield et T.R. Goff (1983). A feeding guide for juvenile Atlantic salmon, *Canadian Manuscript Report of Fisheries and Aquatic Sciences*, n° 1718.

Fauconneau, B., G. Choubert, D. Blanc, P. Breque et P. Luquet (1983). Influence of environmental temperature on flow rate of foodstuffs through the gastrointestinal tract of rainbow trout, *Aquaculture*, vol. 34, p. 27-39.

Fletcher, G.L., M.H. Kao et J.B. Dempson (1988). Lethal freezing temperatures of Arctic char and other salmonids in the presence of ice, *Aquaculture*, vol. 71, p. 369-378.

Fry, F.E.J. (1971). The effect of environmental factors on the physiology of fish, dans Hoar, W.S. et D.J. Randall (dir.). *Fish Physiology*, vol. 6., Academic Press, Massachusetts, États-Unis, p. 1-98.

Gobler, C.J., O.M. Doherty, T.K. Hatternrath-Lehrmann, A.W. Griffith, Y. Kang et R.W. Littraker (2017). Ocean warming since 1982 has expanded the niche of toxic algae blooms in the North Atlantic and North Pacific oceans, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 114(19), p. 4975-4980.

Grove, D.J., L.G. Loizides et J. Nott. (1978). Satiation amount, frequency of feeding and gastric emptying rate of *Salmo gairdneri*, *Journal of Fish Biology*, vol. 12, p. 507-516.

Haigh, N. (2017). *Harmful Algae Handbook*, Microthalassia Consultants, Campbell River, Colombie-Britannique.

Hutchings, J.A., A. Pickle, C.R. McGregor-Shaw et L. Poirier (1999). Influence of sex, body size, and reproduction on overwinter lipid depletion in brook trout, *Journal of Fish Biology*, vol. 55, p. 1020-1028.

- Larsen, M.H., A. Nemitz, M. Steinheuer, J. Lysdal, S.T. Thomassen et G. Holdensgaard (2018). Effects of hatchery feeding practices on fin and operculum condition of juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*), Technical Report, Danish Centre for Wild Salmon.
- Liu, Q. et J. Duston (2016). Preventing sexual maturation in Arctic charr by 24 h light overwinter and suppressing somatic growth, *Aquaculture*, vol. 464, p. 537-544.
- Liu, Q. et J. Duston (2019). Long photoperiod in winter is more effective than food deprivation in stopping unwanted sexual maturation in Arctic charr, *Aquaculture*, vol. 501, p. 213-218.
- McCue, M.D. (2010). Starvation physiology: Reviewing the different strategies animals use to survive a common challenge, *Comparative Biochemistry and Physiology*, Part A, vol. 156, p. 1-18.
- Mohapatra, S., T. Chakraborty, M.A.N. Reza, S. Shimizu, T. Matsubara et K. Ohta (2017). Short-term starvation and realimentation helps stave off *Edwardsiella tarda* infection in red sea bream (*Pagrus major*), *Comparative Biochemistry and Physiology*, Part B, vol. 206, p. 42-53.
- Moutou, K.A., I.D. McCarthy et D.F. Houlihan (1998). The effect of ration level and social rank on the development of fin damage in juvenile rainbow trout, *Journal of Fish Biology*, vol. 52, p. 756-770.
- O'Halloran, J. (2017). Ethical question of the month, *Canadian Veterinary Journal*, vol. 58, p. 1149-1150.
- Pottinger, T.G., M. Rand-Weaver et J.P. Sumpter (2003). Overwinter fasting and re-feeding in rainbow trout: Plasma growth hormone and cortisol levels in relation to body metabolism, *Comparative Biochemistry and Physiology B*, vol. 136, p. 403-417.
- Quinones, R.A., M. Fuentes, R.M. Montes, D. Soto et J. Leon-Munoz (2017). Environmental issues in Chilean salmon farming: A review, *Reviews in Aquaculture*, vol. 11(2), p. 375-402.
- Rollin, B.E. (2018). An ethicist's commentary on starving Arctic charr, *Canadian Veterinary Journal*, vol. 59, p. 118-119.
- Saunders, R.L., B.C. Muise et E.B. Henderson (1975). Mortality of salmonids cultured at low temperature in seawater, *Aquaculture*, vol. 5, p. 243-252.
- Scholander, P.F., L. Van Dam, J.W. Kanwisher, H.T. Hammel et M.S. Gordon (1957). Supercooling and osmoregulation in Arctic fish, *Journal of Cellular and Comparative Physiology*, vol. 49, p. 5-24.
- Simpkins, D.G., W.A. Hubert, C. Martinez Del Rio et D.C. Rule (2003). Physiological responses of juvenile rainbow trout to fasting and swimming activity: Effects on body composition and condition indices, *Transactions of the American Fisheries Society*, vol. 132, p. 576-589.
- Soengas, J.L., E.F. Strong, J. Fuentes, J.A.R. Veira et M.D. Andres (1996). Food deprivation and refeeding in Atlantic salmon, *Salmo salar*: Effects on brain and liver carbohydrate and ketone bodies metabolism, *Fish Physiology and Biochemistry*, vol. 15, p. 491-511.

Stead, S.M., D.F. Houlihan, H.A. McLay et R. Johnstone (1999). Food consumption and growth in maturing Atlantic salmon (*Salmo salar*), *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 56, p. 2019-2028.

Storebakken, T., I.S. Kvien, K.D. Shearer, B. Grisdale-Helland et S.J. Helland (1999). Estimation of gastrointestinal evacuation rate in Atlantic salmon (*Salmo salar*) using inert markers and collection of faeces by sieving: Evacuation of diets with fish meal, soybean meal or bacterial meal, *Aquaculture*, vol. 172, p. 291-299.

Sumpter, J.P., P.Y. LeBail, A.D. Pickering, T.G. Pottinger et J.F. Carragher (1991). The effect of starvation on growth and plasma growth hormone concentrations of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, *General and Comparative Endocrinology*, vol. 83, p. 94-102.

Sveier, H., E. Wathe et E. Lied (1999). Growth, feed and nutrient utilisation and gastrointestinal evacuation time in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.): The effect of dietary fish meal particle size and protein concentration, *Aquaculture*, vol. 180, p. 265-282.

Talbot, C., P.J. Higgins et A.M. Shanks (1984). Effects of pre- and post-prandial starvation on meal size and evacuation rate of juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar* L., *Journal of Fish Biology*, vol. 25, p. 551-560.

Waagbø, R., S.M. Jorgensen, G. Timmerhaus, O. Breck et P.A. Olsvik (2017). Short-term starvation at low temperature prior to harvest does not impact the health and acute stress response of adult Atlantic salmon, *PeerJ*, vol. 5, n° e3273.

Wade, N.M., T.D. Clark, B.T. Maynard, S. Atherton, R.J. Wilkinson, R.P. Smullen et R.S. Taylor (2019). Effects of an unprecedented summer heatwave on the growth performance, flesh colour and plasma biochemistry of marine cage-farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*), *Journal of Thermal Biology*, vol. 80, p. 64-74.

Windell, J.T., D.O. Norris, J.F. Kitchell et J.S. Norris (1969). Digestive response of rainbow trout, *Salmo gairdneri*, to pellet diets, *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, vol. 26, p. 1801-1812.

Tableau 4.1 Taux d'évacuation intestinale (en heures) du saumon de l'Atlantique, de la truite brune et de la truite arc-en-ciel nourris de différents aliments.

Les données sont triées par température, de la plus basse à la plus élevée. À part les données de Waagbø et coll. (2017), les taux d'évacuation varient de 48 heures à 5-7 °C à environ 15 heures à 15-18 °C, relativement indépendamment de l'espèce et de la taille corporelle. Les degrés-jours (Dj) de l'évacuation intestinale varient de 9,1 à 15 Dj dans neuf études, l'exception étant 28 Dj. On constatera que le taux d'évacuation intestinale doit être un des facteurs servant à planifier la durée de jeûne, en tenant compte soigneusement du contexte et des répercussions possibles sur le bien-être.

Espèce	Poids corporel (g)	°C	Temps (heures)	Dj	Référence
<i>Salmo salar</i>	5 600	4	168	28,0	Waagbø et coll., 2017
<i>Salmo trutta</i>	90-300	5,2	42	9,1	Elliott, 1972
<i>S. salar</i>	695	7,1	48	14,2	Sveier et coll., 1999
<i>S. salar</i>	150-200	9	30	11,3	Storebakken et coll., 1999
<i>S. trutta</i>	90-300	9,8	27	11,0	Elliott, 1972
<i>O. mykiss</i>	142	10	28	11,7	Fauconneau et coll., 1983
<i>S. salar</i>	900-1 450	13,4	24	13,4	Aas et coll., 2017
<i>O. mykiss</i>	91	15	24	15,0	Windell et coll., 1969
<i>S. trutta</i>	90-300	15	15	9,4	Elliott, 1972
<i>O. mykiss</i>	140-145	18	14	10,5	Fauconneau et coll., 1983

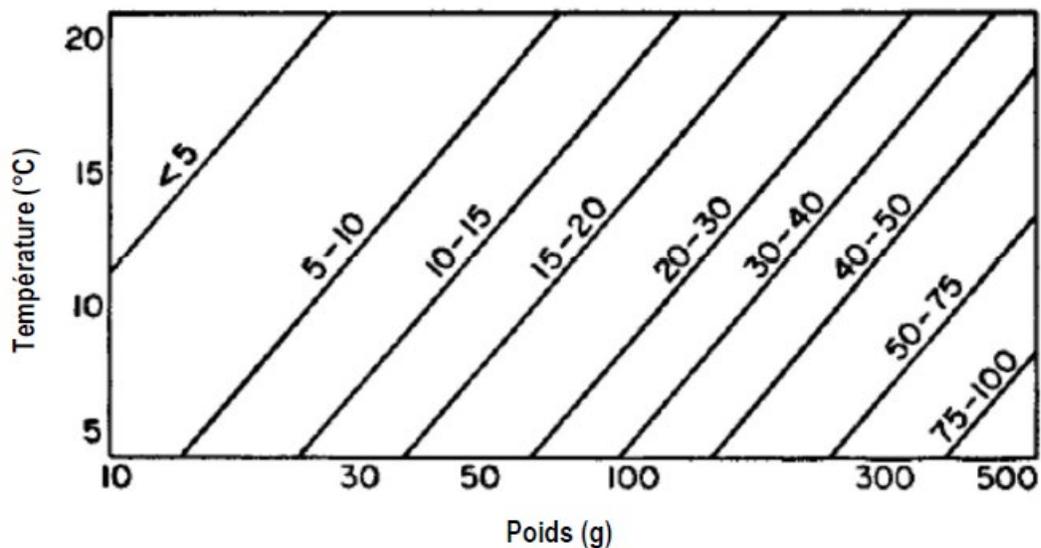


Figure 4.1 Temps d'évacuation intestinale (en heures) de la truite arc-en-ciel par rapport au poids corporel (10-500 g) et la température (5-20 °C).

Les lignes diagonales représentent la durée en heures nécessaire pour que l'estomac se vide après une moule de 1-3 % du poids corporel. Par exemple, une truite de 100 g à 10 °C évacue le contenu stomacal en 20 heures environ. Figure tirée de Grove et coll. (1978).

5 Densité biologique

Conclusions :

1. **Les densités biologiques adéquates en pisciculture varient selon le stade du cycle biologique, la taille et l'espèce ainsi que la taille et la forme des bassins ou parcs en filet.**
2. **Tant que la qualité de l'eau est préservée, des densités biologiques élevées n'ont pas nécessairement d'incidence significative sur les taux de mortalité, mais elles peuvent produire une réponse au stress aigu de l'entassement qui, s'il dure, peut nuire à la santé et au bien-être du poisson.**
3. **Des densités biologiques élevées sont susceptibles de compromettre la fonction immunitaire des salmonidés, car elle peut aggraver les réactions inflammatoires ou supprimer les réponses immunitaires innées et adaptatives, accroissant ainsi la sensibilité des poissons aux pathogènes.**
4. **En général, les densités biologiques élevées peuvent réduire le taux de croissance, l'efficacité de l'alimentation et la qualité des nageoires chez la plupart des salmonidés.**
5. **Les taux d'agression peuvent augmenter quand la densité biologique croît jusqu'à un certain point, à partir duquel les comportements agressifs baissent. La relation varie selon l'espèce et les variations de taille corporelle du groupe.**
6. **Des études incorporant plusieurs indicateurs de bien-être dans un indice de bien-être unique montrent que la relation entre bien-être et densité biologique est extrêmement variable, complexe et obscurcie par la confusion avec divers autres facteurs.**
7. **Comme il existe des différences considérables entre les parcs en filet et les systèmes d'aquaculture en recirculation sur de nombreux aspects, ces systèmes nécessiteraient des recommandations qui leur soient propres.**

5.1 Introduction

La « densité biologique », expression que certains auteurs utilisent de manière interchangeable avec « densité de mise en charge », se définit comme la biomasse de poissons par unité de volume d'eau et est généralement exprimée en unités de kilogramme/mètre cube (kg/m^3). Bien que cette mesure soit utile dans les comparaisons, il est important de noter que la « densité » est un terme relatif et que la répartition des poissons dans un bassin ou un parc en filet est rarement uniforme (c'est-à-dire à des distances du plus proche voisin uniformes). Les salmonidés sont des animaux sociaux, qui préfèrent la présence de leurs conspécifiques, auxquels ils réagissent et dont ils apprennent (par exemple Brown et Brown, 1996; Brown et Laland, 2002; Brown et coll., 2003). Par conséquent, des densités biologiques inadéquates peuvent avoir des répercussions considérables sur leur bien-être. Dans les parcs en filet, les bassins et les systèmes d'aquaculture en recirculation (SAR), la densité biologique a aussi des effets sur la gestion de la qualité de l'eau, la lutte contre les agents pathogènes et la médiation des interactions comportementales entre conspécifiques.

La densité de chargement est aussi une mesure pertinente, particulièrement pour les SAR et d'autres systèmes terrestres. Elle est généralement exprimée en biomasse de poisson par unité de débit d'eau, c'est-à-dire en kilogramme de poisson par litre de débit d'eau fourni par le bassin d'élevage par minute (L/kg/min). Pour maximiser le rendement du capital investi, le but de la plupart des conceptions de SAR est d'atteindre les plus grandes normes de qualité de produit et de bien-être du poisson à la densité biologique maximale possible et la plus faible densité de chargement (Martins et coll., 2010). Des densités biologiques de poissons accrues et un débit d'eau réduit sont les critères de conception visant à maximiser la productivité des SAR, ce qui peut représenter une menace pour la qualité de l'eau ainsi que la santé et le bien-être des poissons. Il est difficile d'établir en soi une relation causale entre la densité biologique et le bien-être du poisson parce que la détérioration d'un ou plusieurs paramètres de qualité de l'eau qui y est associée est un facteur de confusion.

Ici, nous aborderons les effets du changement de la relation spatiale entre conspécifiques (c'est-à-dire l'altération de la densité biologique) par rapport aux perturbations possibles de la qualité de l'eau que causeraient différentes densités biologiques. Ainsi, le chapitre ne traitera pas des relations entre l'augmentation de la densité biologique et les besoins en oxygénation ou les concentrations d'ammoniac, ou encore des incidences possibles d'une qualité de l'eau détériorée sur le bien-être (ces sujets sont traités dans la *section 6 : Qualité de l'eau dans les systèmes d'aquaculture en recirculation*). En effet, l'objectif du chapitre consiste à examiner en quoi la densité biologique en soi affecte différents paramètres pertinents pour le bien-être dans les élevages en cages marines et les SAR.

5.2 Considérations relatives à la taille des bassins et des filets

La plupart des données sur les densités biologiques optimales proviennent d'expériences réalisées dans de petits bassins d'élevage contenant des poissons relativement petits. Or, cette démarche ne convient pas nécessairement quand il faut déterminer les densités biologiques permettant d'éviter un stress chronique et l'érosion corollaire des nageoires et des opercules chez les grands poissons. Des problèmes qui seraient évidents dans de petits bassins expérimentaux ne peuvent pas nécessairement être mis à l'échelle de grands systèmes de production.

L'augmentation de la taille de confinement pourrait modifier la dynamique des différentes densités biologiques. Par exemple, le rapport entre la superficie d'un bassin cylindrique sur le volume d'eau décroît de 5:1 pour un bassin de 1 m de diamètre et 1 m de profondeur (volume de 0,79 m³) à 0,9:1 pour un bassin de 5 m de diamètre et 2 m de profondeur (volume de 39 m³). Cela peut être une variation pertinente quand il s'agit de discuter d'indicateurs de bien-être comme l'érosion des nageoires. De plus, les parcs en filet sont des structures souples soumises à une grande variété de déformations, en raison des marées et d'autres conditions hydrauliques ou des salissures marines, ce qui peut se traduire par des quantités d'espace vital disponibles variables (Turnbull et coll., 2008).

5.3 Effets sur la santé des poissons

5.3.1 Mortalité et réponse au stress

Il semblerait que l'incidence de la densité biologique sur la mortalité des salmonidés soit minime. Des tacons de saumon de l'Atlantique (70 g) élevés à une densité constante de 21, 43, 65 ou 86 kg/m³ pendant 14 semaines dans des bassins de 1 m² (500 L) à 9,9 °C (0,3 L/kg/min)

affichent tous un bon rendement et atteignent le stade de smolt (100 g; Hosfeld et coll., 2009). Les smolts de saumon de l'Atlantique (d'une taille d'environ 80 g) ne présentent pas de taux de mortalité différents s'ils sont stockés dans des bassins de 500 L à une densité de 20 ou 100 kg/m³ à 9,4-10 °C (0,5 L/kg/min) pendant 57 jours (Sveen et coll., 2018). Des taux de mortalité similaires sont observés chez des post-saumoneaux exposés à divers traitements de densité biologique : Liu et coll. (2017) n'ont constaté aucune différence de mortalité chez le saumon de l'Atlantique (~494 g) à des densités biologiques variant de 9 à 53 kg/m³ quand ils sont élevés dans des bassins de ~3 m³ (2 m de diamètre et 1,3 m de profondeur). Élevés pendant 220 jours à des densités allant de 6 à 24 kg/m³, les saumons de l'Atlantique adultes (~1 400 g) ne présentent pas non plus une mortalité différente (Wang et coll., 2019). Chez d'autres espèces, on constate généralement une tendance similaire. Ainsi, Sevier et coll. (2019) ont élevé des ombles chevaliers juvéniles (~177 g) à des densités variant de 30 à 150 kg/m³ dans des bassins de ~0,3 m³ (dimensions : 1 × 1 × 0,27 m) et n'ont observé aucune différence de mortalité. Après avoir élevé des alevins de corégone lavaret (~11 g) à des densités allant de 3,75 à 15 kg/m³ dans des bassins de 50 L à 10,5 °C et 14 °C, Goebel et coll. (2017) sont arrivés à la même conclusion : la mortalité est identique, quelles que soient la température ou la densité. Cependant, chez des alevins de truite arc-en-ciel (~0,21 g), la mortalité diminue à des traitements de densité inférieure (10 contre 12,5 kg/m²) quand ils sont élevés dans des bassins de type raceway de 2,7 m³ pendant 249 jours (Timalsina et coll., 2017). Dans la plupart des études mentionnées, des facteurs cruciaux de la qualité de l'eau comme l'oxygène et l'ammoniac étaient maintenus à des niveaux sûrs afin que les effets de la densité puissent être observés en l'absence de perturbations de la qualité de l'eau.

Malgré une incidence apparemment minimale de la densité biologique sur la mortalité des salmonidés, des densités plus ou moins élevées peuvent susciter une activation de la réponse au stress, selon les espèces (voir la *section 2 : Indicateurs de stress*). Dans un SAR en eau de mer (28-30 ppm) à 16,5 °C, des post-saumoneaux de saumon de l'Atlantique (~450 g) sont stockés à des densités de 8, 15 et 30 kg/m³ dans de grands bassins (3 000 L; 2 m de diamètre, 1,3 m de profondeur). Sur 10 semaines, les densités biologiques sont augmentées respectivement à 16, 31 et 61 kg/m³ (Liu et coll., 2015). Un stress chronique modéré est évident aux densités biologiques les plus élevées à partir de la troisième semaine, comme le traduit l'augmentation du cortisol sérique et de la phosphatase alcaline (qui participe aux premiers stades de la cicatrisation des plaies), mais le facteur de stress n'a pas été déterminé (Liu et coll., 2015). Au début, la densité de chargement est très bonne (>0,5 L/kg/min), mais après 10 semaines à une densité biologique de 61 kg/m³, la densité de chargement était seulement de 0,27 L/kg/min, ce qui indique que la qualité de l'eau aurait été compromise pendant l'étude. Dans un essai de conception similaire, Liu et coll. (2017) ont également constaté qu'après 9 semaines, le poids des saumons avait doublé pour atteindre 0,9 kg aux dernières densités biologiques de 18, 37 et 54 kg/m³. Un stress mineur chronique est détecté à la densité la plus élevée (54 kg/m³), avec l'augmentation de la phosphatase alcaline et du glucose sanguin (Liu et coll., 2017). Des post-saumoneaux (~117 g) à la densité biologique la plus élevée (70 kg/m³) dans des bassins de 3,3 m³ présentent au début une augmentation des taux de cortisol plasmatique et de la libération de cortisol, qui diminuent ensuite après 57 jours (Sundh et coll., 2019). Calabrese et coll. (2017) ont également trouvé que les post-saumoneaux (~115 g) présentaient un taux de cortisol élevé, des niveaux de sodium élevés, de la pCO₂, et une diminution du pH plasmatique quand ils sont stockés au traitement de la densité la plus élevée (125 kg/m³) dans des bassins de 500 L pendant 8 semaines. La tendance s'observe aussi chez le saumon de l'Atlantique adulte (~1 400 g) dont le cortisol plasmatique

augmente à mesure que la densité croît (de 6 à 24 kg/m³) pendant 220 jours (Wang et coll., 2019). En revanche, l'omble chevalier (~177 g) présente une tendance totalement opposée à celle du saumon de l'Atlantique, les poissons ayant un cortisol plasmatique élevé (sans corrélation avec l'efficacité de l'alimentation ni la croissance) aux densités biologiques les plus basses (30 contre 150 kg/m³), surtout au début de l'application des traitements (Sevier et coll., 2019). Aucune différence n'est constatée dans le cortisol plasmatique de truites arc-en-ciel juvéniles à des densités entre 25 et 120 kg/m³ dans des bassins de 1 m³ (2 m de diamètre) après 80 jours (Person-Le Ruyet et coll., 2008). De même, des truites arc-en-ciel (~43 g) dans des bassins de 300 L (0,8 m de diamètre, 0,7 m de profondeur) ne présentent pas de différences de cortisol sérique selon la densité biologique (20 à 80 kg/m³) après 60 jours, mais l'osmolalité sérique diminue aux densités les plus élevées (80 kg/m³), ce qui indique une altération de la capacité d'osmorégulation (Naderi et coll., 2017a). Notons que la concentration de cortisol dans le sang pourrait ne pas convenir comme indicateur du stress causé par l'augmentation des densités et, en tout cas, serait d'interprétation difficile. Chez la truite brune et la truite arc-en-ciel, des augmentations de densité de courte durée produisent une augmentation seulement transitoire des concentrations de cortisol plasmatique, mais elles réduisent significativement la concentration de lymphocytes et de globules blancs neutrophiles (Pickering et Pottinger, 1987).

5.3.2 *Fonction immunitaire et maladies*

Certaines données montrent que l'augmentation de la densité biologique, indépendamment de la qualité de l'eau, nuit à la fonction immunitaire des salmonidés, principalement de la réaction inflammatoire. Des smolts de saumon de l'Atlantique (~80 g) stockés à une densité de 100 kg/m³ pendant 57 jours présentent (par rapport à ceux stockés à des densités inférieures : 20 kg/m³) : un retard de cicatrisation des tissus après une biopsie à l'emporte-pièce; une altération de la contraction des plaies; la régulation à la hausse des gènes immunitaires (particulièrement des gènes associés au retard de cicatrisation des plaies); la répression des gènes de la réparation tissulaire; une réparation de l'épiderme retardée; la diminution du nombre de cellules muqueuses et de la quantité de mucus (ce qui altère la capacité de résistance à une surinfection des plaies); et la minéralisation retardée des nouvelles écailles (Sveen et coll., 2018). Sundh et coll. (2019) ont constaté des effets semblables chez des post-saumoneaux (~177 g) au traitement de la densité la plus élevée (70 kg/m³), accompagnés d'une expression accrue d'ARNm des cytokines pro-inflammatoires et d'une infiltration par les neutrophiles dans l'intestin (qui indique une barrière immunitaire intestinale inefficace). Chez des saumons de l'Atlantique adultes (~1 400 g), Wang et coll. (2019) n'ont pas trouvé de différence dans le lysozyme du plasma (un enzyme antimicrobien, particulièrement pour les bactéries à Gram positif) selon la densité biologique (6 à 24 kg/m³). Chez des truites arc-en-ciel juvéniles (~43 g), on constate l'augmentation du lysozyme du plasma, mais la diminution de l'activité du complément sérique aux densités biologiques les plus élevées après 60 jours (20 à 80 kg/m³; Naderi et coll., 2017a). En revanche, des truites arc-en-ciel juvéniles (~65 g) élevées à des densités de 10, 40 et 80 kg/m³ pendant 30 jours présentent non seulement des baisses similaires du complément sérique et une diminution d'IgM sériques quand la densité biologique augmente, mais aussi la régulation à la baisse de l'expression d'ARNm des gènes immunitaires pro-inflammatoires. Cela pourrait s'expliquer par la hausse des concentrations de cortisol aux densités plus grandes, étant donné qu'il a été prouvé qu'elle supprime les réactions immunitaires (Yarahmadi et coll., 2016). De plus, une réaction inflammatoire soutenue peut endommager les tissus hôtes, par la répression de la cicatrisation et du remodelage tissulaires, et éventuellement accroître la sensibilité des

poissons aux agents pathogènes. Ajoutons que la suppression de l'activité du complément sérique et la réduction des niveaux d'IgM sériques (qui mesurent respectivement les réactions immunitaires innées et adaptatives) indiqueraient aussi l'augmentation de la sensibilité des salmonidés aux agents pathogènes aux densités biologiques les plus élevées.

Plusieurs études ont avancé que les densités biologiques élevées augmenteraient la transmission horizontale d'agents pathogènes ou la gravité des maladies, peut-être en raison des interactions accrues entre conspécifiques ou de l'immunosuppression décrite plus haut (Mazur et coll., 1993; LaPatra et coll., 1996; Bebak-Williams et coll., 2002 : examiné dans Turnbull et coll., 2008). Cependant, la relation entre densité, nombre de poissons, transmission d'agents pathogènes et maladies cliniques est complexe et ce qui peut être vrai pour certains agents pathogènes ne se confirme pas pour d'autres. Par exemple, Samsing et coll. (2014) ont constaté que des densités biologiques plus élevées ($68,5 \text{ kg/m}^3$ par rapport à $7,9 \text{ kg/m}^3$) donnaient des charges de poux du poisson inférieures chez des post-saumoneaux de saumon de l'Atlantique, mais ne modifiaient pas la réussite de l'infection par le pou (% réussite de l'infection = intensité de l'infection \times 100/dose infectieuse). De plus, pour reprendre les résultats de Frenette et coll. (2020) sur la morue, la variation de la sensibilité aux maladies selon l'individu est probablement élevée dans une population.

5.3.3 Croissance et alimentation

À différentes densités biologiques, la croissance peut être compromise peut-être en raison d'une suppression de croissance somatique liée au stress chronique ou tout simplement d'une incapacité à accéder à une alimentation suffisante. Bien que les études établissant un lien entre la croissance et la densité biologique puissent être troublées par des facteurs confondants comme la quantité d'aliments et leur accessibilité, la diminution de la croissance aux densités biologiques élevées est rapportée dans plusieurs études sur les salmonidés. Des post-saumoneaux de saumon de l'Atlantique ($\sim 115 \text{ g}$) stockés à $>50 \text{ kg/m}^3$ présentent une réduction de 42 % du taux de croissance spécifique (TCS) entre 100 et 125 kg/m^3 et une diminution linéaire de l'efficacité de l'alimentation à mesure que la densité biologique augmente (Calabrese et coll., 2017). Une corrélation entre la réduction de la prise alimentaire et l'augmentation de la densité biologique (entre 50 et 125 kg/m^3) est également observée pour ces poissons (Calabrese et coll., 2017). Non seulement les poissons se nourrissent moins, mais l'efficacité de leur alimentation est aussi inférieure. Des post-saumoneaux ($\sim 494 \text{ g}$) dans un SAR à une densité de 28-53 kg/m^3 pèsent moins après 66 jours que des poissons stockés à 18 ou 19-36 kg/m^3 , et leur TCS est plus élevé à la densité la plus basse de l'essai (9-18 kg/m^3 ; Liu et coll., 2017). Chez le saumon de l'Atlantique ($\sim 1413 \text{ g}$) aussi, les densités biologiques élevées dégradent la croissance dans un essai sur 220 jours dans un SAR, les poissons placés au traitement de la plus haute densité (24 par rapport à 6 kg/m^3) présentant un TCS inférieur et une efficacité de l'alimentation moindre que les poissons aux traitements de densité inférieure (6 et 9 kg/m^3 ; Wang et coll., 2019). Néanmoins, Adams et coll. (2007) n'ont pas constaté de différences significatives dans le TCS de saumons de l'Atlantique de taille similaire ($\sim 980 \text{ g}$) entre densité élevée (35 kg/m^3) et basse (15 kg/m^3) après 51 jours. Des truites arc-en-ciel juvéniles ($\sim 43 \text{ g}$) affichent aussi une croissance réduite, un TCS plus bas et une prise alimentaire inférieure après 60 jours à des densités biologiques élevées (80 comparativement à 20 kg/m^3 ; Naderi et coll., 2017a, 2017b), mais, curieusement, ces mêmes poissons présentent une amélioration de l'efficacité de l'alimentation aux densités les plus élevées. Naderi et coll. (2017b) avancent que cela pourrait s'expliquer par

la probabilité moindre d'interactions agressives pendant l'alimentation aux densités élevées (voir aussi la *section 5.4.2 : Interactions entre conspécifiques*). Ce résultat ne se vérifie toutefois pas à des densités supérieures à 80 kg/m³, car une autre étude portant sur des truites arc-en-ciel juvéniles a constaté qu'une mise en charge de 120 kg/m³ pendant 84 jours réduisait l'efficacité de l'alimentation par rapport à celle de poissons placés à des densités de 25 ou 74 kg/m³ (Person-Le Ruyet et coll., 2008). Les alevins de certaines espèces réagiraient différemment aux densités biologiques élevées. Par exemple, chez le corégone lavaret (~11 g), la croissance (TCS) et l'efficacité de l'alimentation se dégradent après 70 jours quand la densité biologique croît (15 comparativement à 3,75 kg/m³; Goebel et coll., 2017), alors que le poids final de truites arc-en-ciel (~180 g) était identique après 3 mois qu'elles soient placées à une densité de 10, 40 ou 80 kg/m³ (North et coll., 2006). En comparaison, chez de jeunes ombles chevaliers (~177 g), les taux de croissance et l'efficacité de l'alimentation diminuent aux densités très élevées (120 et 150 kg/m³), mais aussi aux densités biologiques très basses (30 kg/m³) par rapport aux résultats des densités modérées (60 et 90 kg/m³; Sevier et coll., 2019). Cette tendance de croissance altérée est confirmée par une étude sur des ombles chevaliers âgés de 2 ans (~55 g), dont la croissance et la prise alimentaire diminuent aux densités basses (15 kg/m³) par rapport aux densités modérées et élevées (60 et 120 kg/m³; Jørgensen et coll., 1993). Il semblerait par conséquent que chez la plupart des espèces de salmonidés, les densités biologiques élevées (sans tenir compte des perturbations de la qualité de l'eau) réduisent probablement la croissance et l'alimentation, bien que l'on constate aussi chez l'omble chevalier que la croissance et l'alimentation diminuent aux densités très basses et que la croissance s'améliore aux densités biologiques élevées (mais non très élevées).

5.3.4 État des nageoires et autres indices de santé

Selon l'espèce, la densité biologique peut compromettre l'état des nageoires, probablement comme une fonction des interactions agressives, de l'immunosuppression et des infections opportunistes qui s'ensuivent, ou d'une mauvaise correspondance entre la densité et les paramètres du bassin, par exemple des dimensions ou des matières susceptibles de causer un traumatisme d'abrasion. Chez des post-saumoneaux de saumon de l'Atlantique (~115 g) placés à des densités ≥ 100 kg/m³, on observe que les nageoires pelviennes sont plus endommagées (Calabrese et coll., 2017). Une autre étude a constaté des effets similaires sur des post-saumoneaux (~494 g) élevés dans un SAR, avec une altération des nageoires pectorales à une densité de 53 kg/m³ (par rapport à 36 kg/m³; Liu et coll., 2017). Des saumons de l'Atlantique juvéniles (~113 g) présentent des nageoires dorsales érodées et fendues après 30 jours dans un traitement à densité élevée (30 par rapport à 8 kg/m³; Jones et coll., 2011). De plus, après 84 jours, les nageoires de truites arc-en-ciel juvéniles sont moins érodées aux densités biologiques inférieures (25 comparativement à 120 kg/m³) dans une étude de Person-Le Ruyet et coll. (2008). Après 3 mois, North et coll. (2006) ont constaté que les nageoires de truites arc-en-ciel (~180 g) étaient aussi plus petites dans un traitement à haute densité (80 kg/m³). Dans une revue de sept études antérieures sur l'état des nageoires de truites arc-en-ciel, Ellis et coll. (2002) indiquent que la majorité d'entre elles ont observé des effets nocifs de l'augmentation de la densité biologique. En revanche, des ombles chevaliers (~177 g) stockés pendant 90 jours à des densités variant de 30 à 150 kg/m³ ne subissent pas d'altération des nageoires caudales ou dorsales, quelle que soit la densité (Sevier et coll., 2019).

L'augmentation de la densité nuit aussi à divers autres paramètres de santé comme : les cataractes, dont la prévalence croît aux densités élevées chez le saumon de l'Atlantique (Calabrese et coll., 2017); l'intégrité de la barrière intestinale chez les post-saumoneaux (Sundh et coll., 2019); et le cholestérol chez les truites arc-en-ciel juvéniles (Naderi et coll., 2017b). Toutefois, la protéinémie (un indicateur de l'état nutritionnel) ne semble pas varier quand la densité croît chez les truites arc-en-ciel juvéniles dans une étude réalisée par Naderi et coll. (2017a).

5.4 Effets sur le comportement du poisson et bien-être global

5.4.1 Répartition spatiale

La répartition spatiale des poissons dans un bassin ou un parc en filet est influencée par plusieurs facteurs, comme le débit d'eau (direction et vitesse du courant), l'éclairage, la température, la dispersion des aliments, ou la présence d'un abri, les poissons se regroupant en plus grand nombre quand ils sont menacés (avec des variations selon le stade du cycle biologique et l'espèce). Quand ces facteurs sont constants, la répartition spatiale peut se révéler utile pour indiquer comment les poissons perçoivent leurs conspécifiques et y réagissent. S'ils se regroupent, cela laisserait supposer qu'ils préfèrent la présence de leurs conspécifiques; si leur répartition est aléatoire, ils pourraient ne pas avoir de préférence et si elle est uniforme, il se peut qu'ils trouvent leurs conspécifiques quelque peu aversifs (Turnbull et coll., 2008). Les truites arc-en-ciel tendent à se répartir uniformément dans les bassins du stade d'alevin jusqu'à atteindre leur taille commerciale (dimensions du bassin : $6,5 \times 1,5 \times 1,2$ m, densité : $\sim 14,75$ kg/m³; Heinen et coll., 1996), mais elles se regroupent dans les parcs en filet (dimensions du filet : $3,5 \times 3,5 \times 3,5$ m, densité : $\sim 0,35$ kg/m³; Phillips, 1985). Souvent, les saumons de l'Atlantique (0,23-0,69 kg) se trouvent en bancs denses dans les parcs en filet (Juell et Fosseidengen, 2004) et à diverses densités biologiques, ils ont tendance à occuper seulement 45 à 85 % du volume disponible, selon les conditions d'éclairage et la température de l'eau, qui influent grandement sur leur positionnement tridimensionnel dans les grands enclos (Bell, 2002 : examiné dans Turnbull et coll., 2008). En raison des connaissances très limitées sur le comportement social des saumons de l'Atlantique dans la période marine de leur vie, on ne sait pas pourquoi ils forment ces groupes denses ni si cette formation est normale par rapport à leur comportement naturel.

5.4.2 Interactions entre conspécifiques

Outre le stress social important qu'elles causent, les interactions agressives entre poissons captifs jouent un rôle dans l'altération des nageoires et les blessures corporelles, la capacité à accéder à la nourriture, la sensibilité aux maladies, la transmission horizontale d'agents pathogènes, et parfois même la mortalité. Chez les salmonidés, on suppose souvent que le stockage des poissons à des densités élevées contribuerait à l'atténuation ou l'élimination des agressions ou des effets négatifs de la hiérarchie de dominance, car le plus grand nombre d'interactions agressives nécessaires au maintien de la dominance deviendrait trop coûteux ou impossible à réaliser. Toutefois, les données probantes sont contradictoires. L'hétérogénéité des tailles corporelles peut être un indicateur utile de la hiérarchie d'alimentation, car souvent, les petits poissons le restent en raison de leur accès restreint aux aliments. Liu et coll. (2017) ont constaté que les tailles corporelles de post-saumoneaux (~ 494 g) de saumon de l'Atlantique étaient homogènes (c'est-à-dire que les coefficients de variation [CV] n'étaient pas significativement différents selon le traitement) dans des traitements de densité basse (9 kg/m³; CV = 17,37) et élevée (53 kg/m³;

CV = 16,68), tandis que la taille corporelle était plus variable à des densités basses (8,7 kg/m³; CV = 14,33, comparativement à 44 kg/m³; CV = 4,27) chez des alevins d'omble chevalier (~0,85 g; Brown et coll., 1992). Les taux réels d'agression ont tendance à augmenter quand la densité croît chez les truites arc-en-ciel juvéniles (Keeley, 2000; Cole et Noakes, 1980), tandis que les alevins d'omble chevalier (~0,85 g) sont moins agressifs quand les densités sont plus grandes (44 kg/m³; Brown et coll., 1992). Adams et coll. (2007) ont trouvé que les taux généraux d'agression (mesurés par la fréquence totale de toutes les actions agressives : poursuites, charges, déplacements et pincements des nageoires) entre saumons de l'Atlantique adultes (~980 g) ne différaient pas selon les densités des traitements (15, 25 et 35 kg/m³), mais que, pendant l'alimentation, ces taux augmentaient en cas de diminution de la densité et des niveaux de perturbation par le personnel de l'élevage. En revanche, Brown et coll. (1992) ont constaté qu'aux densités élevées (44 kg/m³), les ombles chevaliers juvéniles (~0,85 g) montraient un nombre significativement inférieur d'interactions agressives et passaient plus de temps à se rassembler en bancs pendant 12 semaines qu'aux densités basses (8,7 kg/m³). Il est aussi possible que le type d'agression varie selon la densité : ainsi, McNicol et Noakes (1984) ont observé que les ombles chevaliers juvéniles passaient d'agressions ouvertes (à savoir pincements et poursuites) à des manifestations d'agressivité quand la densité croissait, mais parce que les densités choisies dans l'étude sont nettement inférieures à celles des élevages, les résultats ne se vérifieront pas nécessairement dans des écloséries ou des piscicultures. Jones et coll. (2011) ont constaté une tendance inverse chez des saumons de l'Atlantique juvéniles (~113 g), qui sont significativement moins agressifs à des densités plus élevées (30 comparativement à 8 kg/m³) pour ce qui est du nombre total de comportements agressifs observés, mais dont la fréquence de morsures croît, ce qui est en corrélation avec des niveaux d'altération des nageoires d'augmentation similaire. D'un point de vue écologique, on peut émettre la théorie qu'en général, le type de compétition passe d'un comportement de « combat » (dans lequel les individus agressifs peuvent monopoliser les ressources alimentaires dans une hiérarchie) à un comportement de « bousculade » (dans lequel les densités sont si élevées que les ressources alimentaires finies ne peuvent pas être monopolisées et sont en fait distribuées plus également entre les individus qui se bousculent; Lomnicki 2009). De plus, outre l'espèce, plusieurs facteurs environnementaux influeraient sur les agressions entre salmonidés, comme la composition et la disponibilité des aliments, la répartition des particules (dans l'espace et le temps), le débit d'eau, le stade du cycle biologique et la température (Ellis et coll., 2002), ce qui complique la détection de profils universels des agressions comme une fonction de la densité.

De façon intéressante, certaines études ont supposé que l'hétérogénéité des tailles pouvait être un outil de gestion des agressions avantageux, selon l'espèce ou le stade du cycle biologique, et en pratique, les piscicultures ont tendance à stocker des poissons de taille peu variable pendant la reproduction, le tri et le classement des poissons. Adams et coll. (2000) supposent que l'ajout de quelques individus de grande taille diminuerait les taux d'agression. En étudiant des tacons de saumon de l'Atlantique 0+, ils ont constaté que les groupes de petits poissons étaient extrêmement agressifs, alors que les groupes contenant quelques grands poissons étaient nettement moins agressifs. De même, Wipf et Barnes (2011) ont remarqué que chez la truite fardée, les agressions augmentaient quand la densité de petits poissons dans un groupe croissait. Toutefois, des ombles chevaliers juvéniles affichaient une tendance opposée : Lahti et Lower (2000) ont trouvé un plus grand nombre d'agressions dans les groupes de poissons aux tailles diverses par rapport aux groupes de poissons de tailles identiques. Yue et coll. (2006) ont examiné si la présence de truites arc-en-ciel de tailles différentes induisait une réponse au stress

ou des changements comportementaux : ils n'ont pas trouvé de différence dans le comportement de poissons de taille moyenne (~123 g) (mesuré en utilisation de l'espace du bassin, en comportement locomoteur et en agressions) qu'ils soient en présence de conspécifiques de taille semblable, plus petite (~46 g), ou plus grande (~314 g), bien que les poissons de taille moyenne aient connu plus d'agressions (poursuites) quand ils étaient placés avec des poissons plus grands. Les concentrations de cortisol plasmatique de poissons de taille moyenne ne sont pas significativement différentes qu'ils soient exposés à des conspécifiques de taille identique, plus petite ou plus grande, mais elles sont toutes plus élevées que la concentration de référence, ce qui indique que l'exposition à de nouveaux poissons, quelle que soit leur taille, stresserait la truite arc-en-ciel. Certains ont aussi supposé que la fourniture d'aliments de façon imprévisible dans le temps et l'espace pourrait servir à réduire la monopolisation de la nourriture et les hiérarchies chez le saumon de l'Atlantique (Kadri et coll., 1996). En effet, on peut manipuler le régime alimentaire, l'éclairage (voir la *section 7 : Éclairage*) et la température pour modifier la position des poissons dans un contenant.

Les interactions non agressives peuvent aussi avoir des conséquences sur le bien-être à différentes densités. Quand des hiérarchies d'alimentation peuvent être établies, elles peuvent être maintenues par des menaces et des manifestations qui entraînent peu ou pas de dommage physique (comme dans Nakano, 1994), mais qui maintiennent les subordonnés dans un état de stress chronique ou de bien-être insuffisant (Cubitt et coll., 2008) ou les empêcheraient d'accéder à la nourriture (Huntingford et coll., 1993). Bien que la question n'ait pas été étudiée de manière extensive dans la littérature récente, certains ont aussi supposé que les densités élevées accroîtraient les collisions entre poissons et avec les parois des bassins ou des parcs en filet, ce qui est susceptible d'augmenter les taux de blessures, notamment des lésions aux pédoncules et des abrasions de museau (truite arc-en-ciel : Collins, 1972; Kils, 1989). Simultanément, d'autres ont avancé qu'en cas de densités trop basses, la réponse à l'alimentation est altérée chez les truites arc-en-ciel (Purser et Hart, 1991; Winfree et coll., 1998), car ce sont des prédateurs visuels qui gagneraient à pouvoir copier le comportement alimentaire de leurs conspécifiques (Phillips, 1985; Pitcher et Parrish, 1993).

5.4.3 *Bien-être global*

Plusieurs études ont intégré de multiples indicateurs physiologiques ou comportementaux afin de produire des cotes (ou des indices) de bien-être global pour les salmonidés d'élevage. Dans une étude portant sur des truites arc-en-ciel juvéniles (~180 g) stockées dans des bassins d'eau douce à circuit ouvert à des densités de 10, 40 et 80 kg/m³ sur une période de 9 mois, North et coll. (2006) ont analysé plusieurs effets sur la population (mortalité, croissance, variation de taille, efficacité de l'alimentation), des critères morphométriques individuels (masse du poisson, état des nageoires, coefficient de condition) et plusieurs indices physiologiques (hématocrites, cortisol plasmatique, activité du lysozyme) au moyen d'une analyse en composantes principales (ACP). Ils ont constaté aux densités basses une tendance à la hausse du cortisol plasmatique et à la baisse de l'activité du lysozyme, ainsi que des coefficients de condition plus bas et une plus grande variation des tailles, ce qui indique la présence possible de hiérarchies de dominance. L'ACP a également identifié un groupe de poissons dans les traitements de toute densité dont l'état des nageoires était bon, mais le coefficient de condition bas. Enfin, leurs analyses ont révélé que les densités élevées ne produisaient pas d'effet constant ni sur le taux de croissance ni sur les indicateurs de bien-être physiologiques chez la truite arc-en-ciel. Dans une étude similaire

sur des saumons de l'Atlantique placés dans 30 parcs en filet marins à des densités variant entre 9,7 et 34 kg/m³, la croissance, l'état des nageoires, le glucose dans le plasma et le cortisol plasmatique ont été combinés au moyen d'une ACP (Turnbull et coll., 2005). Les cotes de bien-être correspondaient aux estimations déclarées par les pisciculteurs sur l'état de bien-être des poissons. Cependant, aucune tendance de la relation entre bien-être et densité n'apparaît avant des densités de 22 kg/m³, après quoi l'augmentation de la densité est significativement liée à la diminution des cotes de bien-être. Autre élément intéressant : aucune relation n'a été établie entre la cote de bien-être et le temps écoulé depuis le classement ou un traitement contre le pou du poisson. Une autre étude, réalisée par Adams et coll. (2007), s'est appuyée sur une ACP pour combiner quatre mesures du bien-être (état corporel, état des nageoires, glucose dans le plasma et cortisol) chez des saumons de l'Atlantique (~980 g) placés dans des bassins d'eau de mer à des densités biologiques de 15, 25 et 35 kg/m³ pendant 51 jours. Leurs analyses ont montré des cotes de bien-être élevées et basses à toutes les densités biologiques, les meilleures cotes moyennes se trouvant dans le traitement de densité modérée (25 kg/m³). Ils ont aussi constaté une interaction entre la « perturbation » (une cote fondée sur la quantité d'activités d'élevage et de passages dans les bassins) et la densité biologique, qui laisse supposer que le lien entre densité biologique et bien-être est complexe et peut être troublé par d'autres facteurs confondants.

5.5 Situations d'élevage aux densités biologiques élevées

Certaines pratiques de l'industrie impliquent des écarts temporaires des densités biologiques normales, comme lors de la rétention avant le classement, du classement et du transport. Ces pratiques suscitent une réponse au stress aigu causé par l'entassement, susceptible de compromettre temporairement le bien-être (aspect brièvement examiné dans la *section 2 : Indicateurs de stress*). Peu d'études se sont intéressées à la manière dont la densité biologique précédant et suivant l'entassement nuit aux réponses au stress aigu et au rétablissement des salmonidés. Cooke et coll. (2000) ont implanté des dispositifs de télémétrie sur des truites arc-en-ciel et surveillé leur activité natatoire. Ils ont constaté qu'elle augmentait quand la densité biologique croissait (de 15 à 60 kg/m³), mais que les tendances de l'activité sur une période de 24 h (à savoir moindre à la mi-journée, plus grande la nuit) étaient inchangées. Par ailleurs, ils ont montré que la hausse de la densité entraînait l'augmentation de la consommation d'oxygène, probablement en raison de l'activité accrue. Chandroo et coll. (2005) aussi ont suivi le comportement de truites arc-en-ciel à l'aide de dispositifs de télémétrie. Ils ont compris que l'activité natatoire et la consommation d'oxygène augmentaient pendant le transport et revenaient aux valeurs de référence pendant la période de récupération de 48 heures. Toutefois, les performances natatoires de la truite (mesurée par la vitesse critique et l'endurance) sont compromises au-delà de cette période comparativement à des témoins qui n'ont pas été transportés. Bien que les dispositifs de télémétrie puissent constituer un facteur de stress en eux-mêmes (par exemple Semple et coll., 2018), ces études indiquent qu'il est crucial que l'aération de l'eau soit adéquate pendant les situations de densité élevée impliquées par l'entassement et le transport.

5.6 Références

Adams, C., F. Huntingford, J. Turnbull, S. Arnott et A. Bell (2000). Size heterogeneity can reduce aggression and promote growth in Atlantic salmon parr, *Aquaculture International*, vol. 8, p. 543-549.

- Adams, C.E., J.F. Turnbull, A. Bell, J.E. Bron et F.A. Huntingford (2007). Multiple determinants of welfare in farmed fish: Stocking density, disturbance, and aggression in Atlantic salmon (*Salmo salar*), *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, vol. 64, p. 336-344.
- Bebak-Williams, J., P.E. McAllister, G. Smith et R. Boston (2002). Effect of fish density and number of infectious fish on the survival of rainbow trout fry, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum), during epidemics of infectious pancreatic necrosis, *Journal of Fish Diseases*, vol. 25, p. 715-726.
- Bell, A. (2002). The effects of some management practices on the behaviour and welfare of farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*) in marine cages, thèse de doctorat, Université de Stirling, Royaume-Uni.
- Brown, G.E. et J.A. Brown (1996). Kin discrimination in salmonids, *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, vol. 6, p. 201-219.
- Brown, G.E., J.A. Brown et R.K. Srivastava (1992). The effect of stocking density on the behaviour of Arctic charr (*Salvelinus alpinus* L.), *Journal of Fish Biology*, vol. 41, p. 955-963.
- Brown, C. et K. Laland (2002). Social enhancement and social inhibition of foraging behaviour in hatchery-reared Atlantic salmon, *Journal of Fish Biology*, vol. 61(4), p. 987-998.
- Brown, C., A. Markula et K. Laland (2003). Social learning of prey location in hatchery-reared Atlantic salmon, *Journal of Fish Biology*, vol. 63(3), p. 738-745.
- Calabrese, S., T.O. Nilsen, J. Kolarevic, L.O.E. Ebbesson, C. Pedrosa, S. Fivelstad, C. Hosfeld, S.O. Stefansson, B.F. Terjesen, H. Takle, C.I.M. Martins, H. Sveier, F. Mathisen, A.K. Imsland et S.O. Handeland (2017). Stocking density limits for post-smolt Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) with emphasis on production performance and welfare, *Aquaculture*, vol. 462, p. 363-370.
- Chandroo, K.P., S.J. Cooke, R.S. McKinley et R.D. Moccia (2005). Use of electromyogram telemetry to assess the behavioural and energetic responses of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum) to transportation stress, *Aquaculture Research*, vol. 36, p. 1226-1238.
- Cole, K.S. et D.L.G. Noakes (1980). Development of early social behaviour of rainbow trout, *Salmo gairdneri* (Pisces, Salmonidae), *Behavioural Processes*, vol. 5, p. 97-112.
- Collins, R.A. (1972). Cage culture of trout in warmwater lakes, *American Fish Farmer*, vol. 3(7), p. 4-7.
- Cooke, S.J., K.P. Chandroo, T.A. Beddow, R.D. Moccia et R.S. McKinley (2000). Swimming activity and energetic expenditure of captive rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum) estimated by electromyogram telemetry, *Aquaculture Research*, vol. 31, p. 495-505.
- Cubitt, K.F., S. Winberg, F.A. Huntingford, S. Kadri, V.O. Crampton et Ø. Øverli (2008). Social hierarchies, growth and brain serotonin metabolism in Atlantic salmon (*Salmo salar*) kept under commercial rearing conditions, *Physiology & Behavior*, vol. 94(4), p. 529-535.
- Ellis, T., B. North, A.P. Scott, N.R. Bromage, M. Porter et D. Gadd (2002). The relationships between stocking density and welfare in farmed rainbow trout, *Journal of Fish Biology*, vol. 61, p. 493-531.

Frenette, A., T. Harrold, P. Bentzen, I.G. Paterson, R.M. Malenfant, G. Nardi, M.D.B. Burt et M. Duffy (2020). *Loma morhua* infections in Atlantic cod (*Gadus morhua*) reveal relative parasite resistance and differential effects on host growth among family lines, *Aquaculture*, vol. 522, n° 735111.

Goebel, S.E., J. Baer et J. Geist (2017). Effects of temperature and rearing density on growth of juvenile European whitefish (*Coregonus macrophthalmus*) in aquaculture, *Fundamental and Applied Limnology*, vol. 189(3), p. 257-266.

Heinen, J.M., J.A. Hankins, A.L. Weber et J. Watten (1996). A semi-closed recirculating water system for high density culture of rainbow trout, *Progressive Fish-Culturist*, vol. 58, p. 11-22.

Hosfeld, C.D., J. Hammer, S.O. Handeland, S. Fivelstad et S.O. Stefansson (2009). Effects of fish density on growth and smoltification in intensive production of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.), *Aquaculture*, vol. 294, p. 236-241.

Huntingford, F.A., N.B. Metcalfe et J.E. Thorpe (1993). Social status and feeding in Atlantic salmon *Salmo salar* parr: the effect of visual exposure to a dominant, *Ethology*, vol. 94(3), p. 201-206.

Jones, H.A.C., C. Noble, B. Damsgard et G.P. Pearce (2011). Social network analysis of the behavioural interactions that influence the development of fin damage in Atlantic salmon parr (*Salmo salar*) held at different stocking densities, *Applied Animal Behaviour Science*, vol. 133, p. 117-126.

Jørgensen, E.H., J.S. Christiansen et M. Jobling (1993). Effects of stocking density on food intake, growth performance and oxygen consumption in Arctic charr (*Salvelinus alpinus*), *Aquaculture*, vol. 110, p. 191-204.

Juell, J. et J.E. Fosseidengen (2004). Use of artificial light to control swimming depth and fish density of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in production cages, *Aquaculture*, vol. 233, p. 269-282.

Kadri, S., F.A. Huntingford, N.B. Metcalfe et J.E. Thorpe (1996). Social interactions and the distribution of food among one-sea-winter Atlantic salmon (*Salmo salar*) in a sea-cage, *Aquaculture*, vol. 139, p. 1-10.

Keeley, E.R. (2000). An experimental analysis of territory size in juvenile steelhead trout, *Animal Behaviour*, vol. 59, p. 477-490.

Kils, U. (1989). Some aspects of schooling for aquaculture, ICES C.M.1989/F:12, 10 p.

Lahti, K. et N. Lower (2000). Effects of size asymmetry on aggression and food acquisition in Arctic charr, *Journal of Fish Biology*, vol. 56, p. 915-922.

LaPatra, S.E., J.M. Groff, T.L. Patterson, W.D. Shewmaker, M. Casten, J. Siple et A.K. Hauck (1996). Preliminary evidence of sturgeon density and other stressors on manifestation of white sturgeon iridovirus disease, *Journal of Applied Aquaculture*, vol. 6, p. 51-58.

Liu, B., Y. Liu et G. Sun (2017). Effects of stocking density on growth performance and welfare-related physiological parameters of Atlantic salmon *Salmo salar* L. in recirculating aquaculture system, *Aquaculture Research*, vol. 48, p. 2133-2144.

- Liu, B., Y. Liu et X. Wang (2015). The effect of biodensity on growth and seven physiological parameters with assessment of their potential as stress response indicators for the Atlantic salmon (*Salmo salar*), *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology*, vol. 48(3), p. 177-192.
- Lomnicki, A. (2009). Scramble and contest competition, unequal resource allocation, and resource monopolization as determinants of population dynamics, *Evolutionary Ecology Research*, vol. 11, p. 371-380.
- Martins, C.I.M., E.H. Eding, M.C.J. Verdegem, L.T.N. Heinsbroek, O. Schneider, J.P. Blancheton, E. Roque d'Orbcastel et J.A.J. Verreth (2010). New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability, *Aquacultural Engineering*, vol. 43(3), p. 83-93.
- Mazur, C.F., D. Tillapaugh et G.K. Iwama (1993). The effects of feeding level and rearing density on the prevalence of *Renibacterium salmoninarum* in chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*), *Aquaculture*, vol. 117, p. 141-147.
- McNicol, R.E. et D.L.G. Noakes (1984). Environmental influences on territoriality of juvenile brook char *Salvelinus fontinalis* in a stream environment, *Environmental Biology of Fishes*, vol. 10, p. 29-42.
- Naderi, M., S. Keyvanshokoh, A.P. Salati et A. Ghaedi (2017a). Combined or individual effects of dietary vitamin E and selenium nanoparticles on humoral immune status and serum parameters of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) under high stocking density, *Aquaculture*, vol. 474, p. 40-47.
- Naderi, M., S. Keyvanshokoh, A.P. Salati et A. Ghaedi (2017b). Effects of chronic high stocking density on liver proteome of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), *Fish Physiology and Biochemistry*, vol. 43, p. 1373-1385.
- Nakano, S. (1994). Variation in agonistic encounters in a dominance hierarchy of freely interacting red-spotted masu salmon (*Oncorhynchus masou ishikawai*), *Ecology of Freshwater Fish*, vol. 3(4), p. 153-158.
- North, B.P., J.F. Turnbull, T. Ellis, M.J. Porter, H. Migaud, J. Bron et N.R. Bromage (2006). The impact of stocking density on the welfare of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), *Aquaculture*, vol. 255, p. 466-479.
- Person-Le Ruyet, J., L. Labbé, N. Le Bayon, A. Sévère, A. Le Roux, H. Le Delliou et L. Quémener (2008). Combined effects of water quality and stocking density on welfare and growth of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), *Aquatic Living Resources*, vol. 21, p. 185-195.
- Phillips, M.J. (1985). Behaviour of rainbow trout, *Salmo gairdneri* Richardson, in marine cages, *Aquaculture and Fisheries Management*, vol. 1, p. 223-232.
- Pickering, A.D. et T.G. Pottinger (1987). Poor water quality suppresses the cortisol response of salmonid fish to handling and confinement, *Journal of Fish Biology*, vol. 30(3), p. 363-374.
- Pitcher, T.J. et J.K. Parrish (1993). Functions of shoaling behaviour in teleosts, dans Pitcher, T.J. (dir.). *Behaviour of Teleost Fishes*, Chapman & Hall, Londres, p. 363-439.

- Purser, J. et P. Hart (1991). Effect of stocking density on the growth of juvenile rainbow trout, *Austasia Aquaculture*, vol. 5, p. 46-48.
- Samsing, F., F. Oppedal, D. Johansson, S. Bui et T. Dempster (2014). High host densities dilutes sea lice *Lepeophtheirus salmonis* loads on individual Atlantic salmon, but do not reduce lice infection success, *Aquaculture Environment Interactions*, vol. 6, p. 81-89.
- Semple, S.L., I.M. Mulder, T. Rodriguez-Ramos, M. Power et B. Dixon (2018). Long-term implantation of acoustic transmitters induces chronic inflammatory cytokine expression in adult rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), *Veterinary Immunology and Immunopathology*, vol. 205, p. 1-9.
- Sevier, A., R. Smith, T. Benfey, R. Danzmann, N. Bernier et R. Moccia (2019). Effects of biodensity on the growth, stress physiology, and welfare of Arctic charr (*Salvelinus alpinus*) in freshwater, *Comparative Biochemistry and Physiology, Part A*, vol. 231, p. 91-103.
- Sundh, H., F. Finne-Fridell, T. Ellis, G.L. Taranger, L. Niklasson, E.F. Pettersen, H.I. Wergeland et K. Sundell (2019). Reduced water quality associated with higher stocking density disturbs the intestinal barrier functions of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.), *Aquaculture*, vol. 137, n° 734356.
- Sveen, L.R., G. Timmerhaus, A. Krasnov, H. Takle, S.O. Stefansson, S.O. Handeland et E. Ytteborg (2018). High fish density delays wound healing in Atlantic salmon (*Salmo salar*), *Scientific Reports*, vol. 8, n° 16907.
- Timalsina, P., C.N.R. Yadav, G.P. Lamsal, K.P. Acharya et N.O. Pandit (2017). Effect of stocking density and source of animal protein on growth and survival of rainbow trout fingerlings in flow-through system at Nuwakot, Nepal, *Aquaculture Reports*, vol. 8, p. 58-64.
- Turnbull, J., A. Bell, C. Adams, J. Bron et F. Huntingford (2005). Stocking density and welfare of cage farmed Atlantic salmon: Application of a multivariate analysis, *Aquaculture*, vol. 243, p. 121-132.
- Turnbull, J.F., B.P. North, T. Ellis, C.E. Adams, J. Bron, C.M. MacIntyre et F.A. Huntingford (2008). *Chapter 8: Stocking Density and the Welfare of Farmed Salmonids*, dans Branson, E.J. (dir.). *Fish Welfare*, John Wiley & Sons, New Jersey, p. 111-120.
- Wang, Y., L. Chi, Q. Liu, Y. Xiao, D. Ma, Z. Xiao, S. Xu et J. Li (2019). Effects of stocking density on the growth and immunity of Atlantic salmon *Salmo salar* reared in recirculating aquaculture system (RAS), *Journal of Oceanology and Limnology*, vol. 31(1), p. 350-360.
- Winfrey, R.A., G.A. Kindschi et H.T. Shaw (1998). Elevated water temperature, crowding, and food deprivation accelerate fin erosion in juvenile steelhead, *Progressive Fish-Culturist*, vol. 60, p. 192-199.
- Wipf, M.M. et M.E. Barnes (2011). Competitor density and size effects on aggression and feeding in cutthroat trout: Implications for aquaculture, *The Open Fish Science Journal*, vol. 4, p. 62-66.
- Yarahmadi, P., H.K. Miandare, S. Fayaz et C.M.A. Caipang (2016). Increased stocking density causes changes in expression of selected stress- and immune-related genes, humoral innate

immune parameters and stress responses of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), *Fish and Shellfish Immunology*, vol. 48, p. 43-53.

Yue, S., I.J.H. Duncan et R. Moccia (2006). Do differences in conspecific body size induce social stress in domestic rainbow trout?, *Environmental Biology of Fishes*, vol. 76, p. 425-431.

Relation générale avec une :					
Section	Paramètre	Espèces	Densité biologique croissante	Densité biologique décroissante	Exceptions/mises en garde
5.3.1	<i>Mortalité</i>	Saumon de l'Atlantique, omble chevalier et corégone lavaret		Aucune différence	Diminution de la mortalité des alevins de truite arc-en-ciel aux densités basses
		Saumon de l'Atlantique	Augmentation		
	<i>Activation de la réponse au stress</i>	Truite arc-en-ciel		Aucune différence	
Ombles chevaliers				Augmentation	
5.3.2	<i>Fonction immunitaire</i>	Saumon de l'Atlantique et truite arc-en-ciel	Détérioration		Paramètre non étudié pour l'omble chevalier
5.3.3	<i>Croissance et efficacité de l'alimentation</i>	Saumon de l'Atlantique, truite arc-en-ciel et corégone lavaret	Détérioration		
		Ombles chevaliers	Détérioration en cas de densité très élevée	Détérioration en cas de densité très basse	
5.3.4	<i>Altération des nageoires</i>	Saumon de l'Atlantique et truite arc-en-ciel	Augmentation		
		Ombles chevaliers		Aucune différence	
5.4.1	<i>Répartition spatiale</i>	Saumon de l'Atlantique		s.o.	Rassemblement dans les parcs en filet
		Truite arc-en-ciel		s.o.	Répartition uniforme pendant tout le cycle de production
5.4.2	<i>Hétérogénéité des tailles corporelles</i>	Saumon de l'Atlantique		Aucune différence	
		Ombles chevaliers			Plus variable
	<i>Agressions</i>	Saumon de l'Atlantique	Augmentation pendant l'alimentation		
		Truite arc-en-ciel	Augmentation		
		Ombles chevaliers			Augmentation
	<i>Type d'agression</i>	Saumon de l'Atlantique	Augmentation des morsures		
		Ombles de fontaine	Manifestations d'agression	Agressions ouvertes	
	<i>Risque de collisions avec des conspécifiques</i>	Salmonidés	Augmentation		
	<i>Réponse à l'alimentation passant par la vision</i>	Truite arc-en-ciel et autres espèces de prédateurs visuels		Détérioration en cas de densité très basse	

5.4.3	<i>Cote de bien-être global</i>	Saumon de l'Atlantique	Diminution	Seulement au-dessus de 22 kg/m ³ dans une étude sur des parcs en filet – pas d'effet discernable dans les bassins marins
		Truite arc-en-ciel	Bien-être non constant à toutes les densités	Dans des bassins d'eau douce

Tableau 5.1 Résumé des tendances générales de différents paramètres pertinents en matière de bien-être pour plusieurs espèces de salmonidés.

Les références et des détails sont donnés dans le corps du texte.

6 Qualité de l'eau dans les systèmes d'aquaculture en recirculation (SAR)

Conclusions :

- 1. La régulation thermique permet d'optimiser le taux de croissance, mais elle peut poser des problèmes de bien-être autour de l'achèvement de la smoltification et la durée de la fenêtre d'adaptation des smolts, ainsi que pendant le grossissement jusqu'au poids de 4 kg. Une température de 10 °C est sans danger pour la smoltification et une température supérieure à 13 °C représente un risque pour le bien-être des poissons s'ils doivent être transférés dans des cages marines. Il semble qu'une température de 14 à 17 °C soit sûre pour le grossissement à ≥ 4 kg dans des SAR.**
- 2. Une ligne directrice recommandant une saturation en oxygène de 80 % au drain de sortie sert à éviter l'hypoxie. La répartition spatiale de l'oxygène dans les grands bassins est relativement uniforme, quand les taux d'échange entre les collecteurs de prise d'eau et les bassins sont $>0,3$ L/kg/min.**
- 3. On ne connaît pas les concentrations de dioxyde de carbone (CO₂) sans danger, mais une teneur de 10 mg/l est proposée. Les cycles de 24 h du CO₂ dans les bassins de SAR peuvent exposer les poissons à une hypercapnie épisodique, mais ce sujet n'a pas fait l'objet d'études scientifiques. La surveillance continue du CO₂ est techniquement faisable, mais aucune donnée n'a été publiée en la matière. Il arrive que l'hypercapnie chronique entraîne des néphrocalcinoses et des cataractes, qui s'expliquent toutefois aussi par des facteurs prédisposants non définis dans la littérature.**
- 4. Les matières en suspension représentent une menace pour la qualité de l'eau et le bien-être du saumon dans les SAR, en raison de la variabilité de la qualité des aliments qui perturbe la santé intestinale et l'intégrité des fèces. La variation des aliments commercialisés d'un lot à l'autre menace le bien-être des poissons dans les SAR. Pour parvenir à des régimes alimentaires sans farine de poisson, il faut mieux connaître les interactions entre nutriments et liants ainsi que la santé intestinale et l'intégrité des fèces aux fins de gestion de la charge de matières en suspension.**
- 5. Pour l'heure, on ne connaît pas avec certitude les niveaux d'exposition chronique à l'ozone ne présentant pas de danger.**

6.1 Introduction

Les systèmes d'aquaculture en recirculation (SAR) sont bien établis dans les élevages de saumon de l'Atlantique pour la production du stade d'œuf à celui de smolt. Cependant, en raison des prix records sur le marché, la production de saumons de l'Atlantique dans des SAR jusqu'à la taille de récolte semble, elle aussi, économiquement viable, à condition que la température et les densités de mise en charge soient relativement élevées et que les coûts des aliments et de l'électricité soient réduits (Bjørndal et Tusvik, 2019; Song et coll., 2019). Or, afin d'établir des élevages de saumon rentables à densité élevée dans des SAR, les marges d'erreur sont étroites et des problèmes de bien-être peuvent rapidement se poser. C'est pourquoi une gestion habile est

essentielle. Toutes les études citées ici utilisent des saumons de l'Atlantique diploïdes. Les triploïdes pourraient devenir importants dans la production en SAR en vue d'éviter le problème important de la maturation sexuelle non souhaitée, mais ils nécessiteraient d'autres lignes directrices que celles visant les diploïdes. À titre d'exemple, la température optimale pour les post-saumoneaux triploïdes est d'environ 3 °C inférieure à celle pour les diploïdes (Sambraus et coll., 2017). Les questions apparues depuis l'excellente revue de la littérature de Thorarensen et Farrell (2011) sont synthétisées ici. La revue se limite au saumon de l'Atlantique, dominant dans l'industrie et dans la recherche et développement sur les SAR.

6.2 Température

La régulation thermique permet d'accélérer la croissance et, conjuguée à un réglage de la photopériode, elle permet la production de smolts hors-saison. Une manipulation inadéquate de ces deux facteurs peut perturber la smoltification et ainsi causer une mortalité élevée après le transfert dans des cages marines. Les juvéniles de taille ordinaire (~0,1 kg) élevés en eau douce ont un risque de mortalité plus élevé après leur transfert. Les poissons transférés à un poids de 0,3-0,5 kg sont probablement en mesure de tolérer un transfert vers l'eau de mer côtière en raison de leur grande taille, mais la littérature scientifique primaire ne contient pas de données sur la question. Chez les saumons élevés jusqu'à la récolte dans des SAR, les préoccupations concernant la smoltification sont nettement moindres, car les températures et la salinité sont maîtrisables.

La température d'eau douce la plus élevée permettant l'achèvement de la smoltification sans danger se situe entre 10 et 13 °C, avec des facteurs interdépendants comme la photopériode, le génotype et la géographie. Après 7 semaines de photopériodes courtes (février-avril), la transition vers une lumière constante (LL) stimule l'achèvement normal de la smoltification après 400 degrés-jours (Dj) dans un régime de températures froides (augmentation de 4 à 10,8 °C entre avril et juin) et moyennes (7-13,7 °C). En comparaison, un régime chaud (10,5-17,3 °C) avance le moment de la smoltification, mais donne des smolts de qualité médiocre (Sigholt et coll., 1998). L'élevage à 12 °C avance la smoltification d'environ un mois par rapport à 8 °C, mais le rendement marin n'a pas été évalué (Handeland et coll., 2013a). De même, un autre stock norvégien élevé à 12-13 °C pendant tout l'hiver termine sa smoltification environ un mois plus tôt que les poissons placés à température ambiante, mais transférés dans l'eau de mer, ces poissons ont une croissance relativement lente, signe d'une smoltification compromise (Solbakken et coll., 1994). Dans le stock de la rivière Saint-Jean (RSJ), le moment de la smoltification et le degré de tolérance à la salinité étaient similaires à une température constante de 10 et <5 °C (Duston et Saunders, 1995). Le stock RSJ élevé à une température constante de 16 °C à partir d'octobre termine sa smoltification au printemps, mais on obtient de meilleures caractéristiques de smolts à une température inférieure (Johnston et Saunders, 1981). En Tasmanie, un système en circuit ouvert (4-9 °C) prépare mieux les smolts à leur transfert vers les sites marins que quand la même cohorte est élevée dans un SAR à 14 °C, mais le rôle de la température fait encore l'objet de conjectures (van Rijn et coll., 2020).

Après la fin de la smoltification, le temps acceptable pour un transfert sécurisé vers l'eau de mer dépend de la température. Dans les écloséries classiques alimentées en eau superficielle, la fenêtre des smolts du stock RSJ se ferme rapidement en raison du réchauffement en mai au-dessus de 10 °C, tandis qu'à une température constante de 10 °C, la fenêtre dure environ

6 semaines (Duston et coll., 1991). En Norvège, les smolts maintenus à une température constante de 6, 10, 12 ou 14 °C à partir de début juin présentent une tolérance à la salinité élevée similaire pendant environ 4 semaines jusqu'à début juillet (Stefansson et coll., 1998).

L'élevage de post-saumoneaux jusqu'à un poids de 4-5 kg dans des SAR, en eau douce ou salée, est le nouveau défi de l'heure. Le Freshwater Institute du Conservation Fund (CFFI, Institut de l'eau douce du Fonds de conservation) a fait grossir des saumons de l'Atlantique de 0,3 à 4 kg à une température de 15-16 °C sans problème de bien-être, comme le montrent leur croissance, leur survie, des observations anecdotiques d'interactions entre poissons, la compétition alimentaire et leur répartition dans le bassin (Davidson et coll., 2016a). Dans l'eau de mer, la température optimale de croissance est de 12,8 °C pour une taille corporelle de 70-150 g et de 14 °C pour une taille de 150-300 g; une température de 18 °C inhibe la croissance (Handeland et coll., 2008). Dans les cages marines d'un fjord norvégien ayant une stratification thermique, les saumons de l'Atlantique (1,3 kg) se rassemblent entre 16,3 et 17,5 °C, ce qui laisse supposer qu'il s'agit de leur température optimale (Johansson et coll., 2006). De même, des poissons de 3,6-4,2 kg (origines génétiques : rivière Philippe en Nouvelle-Écosse) dans des cages marines en Tasmanie préfèrent une température de 16,5-17,5 °C et évitent les températures supérieures à 20,1 °C (Stehfest et coll., 2017).

6.3 Oxygène dissous (O.D.)

L'hypoxie est une menace grave pour le bien-être du poisson. De plus, cette menace grandit avec l'augmentation de la température de l'eau, puisque la solubilité d'O₂ diminue presque linéairement avec la température, et que la demande d'O₂ augmente exponentiellement. Par conséquent, l'injection d'oxygène et la surveillance continue de l'oxygène dissous (O.D.) sont essentielles dans les SAR. L'arrivée d'une eau sursaturée en oxygène par des collecteurs de prise d'eau parfaitement conçus permettrait une valeur d'O.D. uniforme d'environ 10 mg/l partout dans des bassins de 150 m³ dont la densité de mise en charge est de 100 kg/m³ (Davidson et Summerfelt, 2004). En général, les valeurs d'O.D. sont mesurées au drain de sortie, où elles sont inférieures. Au CFFI, l'O.D. au drain de sortie était maintenu à une saturation de 100 % aux fins de grossissement de saumons de l'Atlantique jusqu'à 4 kg (10 mg/l à 15,2 °C; Davidson et coll., 2016a). Dans les essais de densité de mise en charge, on a supposé qu'une saturation en O.D. de plus de 80 % à 10 °C au drain de sortie n'était pas limitante (Sveen et coll., 2016). Chez des post-saumoneaux (0,3 kg) dans de l'eau de mer à 16 °C soumis à une hypoxie pendant 2 heures par jour pendant trois semaines, une saturation de 70 % (5,6 mg/l O.D.) est le seuil estimé à partir duquel la croissance diminue, et une saturation de 60 % (4,9 mg/l) est proposée comme seuil minimal acceptable pour le bien-être du poisson (Remen et coll., 2012). La température et la taille corporelle modifient les valeurs sûres : les seuils de tolérance à l'hypoxie pour des post-saumoneaux dans des cages marines (~0,5-0,6 kg) à 6, 12, 16 et 18 °C sont estimés à une saturation de 30, 39, 47 et 55 % (2,9, 3,4, 3,8 et 4,2 mg/l; Remen et coll., 2013). Des saumons de l'Atlantique du stock de la rivière Saint-Jean (140 g) dans 32 ppm à 12 °C élevés à une saturation de 70 % (environ 6,1 mg/l) pendant trois semaines présentent un gain de poids de 30 % inférieur à celui de poissons élevés à une saturation de 100 %. Pendant la période de réchauffement qui suit, soit une augmentation de 1 °C/semaine jusqu'à 20 °C, la croissance reste inférieure à une saturation de 70 % comparativement à une saturation de 100 %, avec des mortalités se produisant après un mois à 20 °C et une saturation de 70 %, mais sans

compromission de la réponse immunitaire innée aux agents pathogènes bactériens (Gamperl et coll., 2020; Zanuzzo et coll., 2020).

On parvient facilement à l'hyperoxie (>100 % O.D.) au moyen d'injections d'O₂, mais elle peut aussi représenter une menace pour le bien-être du poisson. De l'oxygène dissous à une saturation allant jusqu'à 178 % à 9 °C pendant cinq semaines supprime le rythme respiratoire des pré-smolts (30 g), causant l'augmentation des concentrations de CO₂ dans le sang, mais sans effet négatif sur la croissance ni la survie (Hosfeld et coll., 2010). Les auteurs ont veillé à ce que les pressions partielles du gaz total de l'eau d'élevage soient normobariques et que les concentrations de CO₂ soient faibles (<2 mg/l). Si l'O₂ est incorrectement injecté et que la somme des pressions partielles de tous les gaz dissous est supérieure à la pression atmosphérique (hyperoxie hyperbarique), le risque de maladie des bulles de gaz est élevé (Bouck, 1980).

6.4 Dioxyde de carbone

Le taux d'excrétion de CO₂ par poisson est proportionnel à la demande d'O₂ des poissons, qui est en grande partie déterminée par leur prise alimentaire. De plus, les bactéries nitrifiantes du filtre biologique produisent 5,85 g de CO₂ par gramme d'ammoniac consommé (Ebeling et coll., 2006). Les concentrations élevées de CO₂ dans les SAR sont une menace pour le bien-être du poisson. Certains téléostéens marins y sont très sensibles : une concentration de CO₂ de 8 mg/l nuit ainsi sérieusement à la morue (Moran et coll., 2012). Les salmonidés y sont plus tolérants, mais les niveaux sans danger recommandés tombent de 20 mg/l à 10 mg/l (Thorarensen et Farrell, 2011). La croissance des post-saumoneaux pendant 12 semaines est inférieure à 19 mg/l de CO₂, par rapport à une concentration de 12 mg/l. Aussi, à 5 mg/l de CO₂, on observe quelques indications de meilleures performances comparativement à 12 mg/l, mais des variations considérables sont constatées entre répétitions de l'expérience (Mota et coll., 2019). Thorarensen et Farrell (2011) ont trouvé qu'il manquait des données cruciales sur les menaces que pourraient poser les variations temporelles et spatiales du CO₂ dans les bassins d'élevage de SAR. Les variations spatiales de l'O₂ (et probablement du CO₂) le long du rayon de 6 m d'un grand bassin d'une densité de mise en charge de 76 kg/m³ apparaissent clairement, mais ne constituent pas un risque pour le bien-être : elles varient de 8,6-10 mg/l (saturation de 78 à 92 %; Gorle et coll., 2018).

Les changements temporels des concentrations de CO₂ sur une période de 24 heures sont dus au cycle quotidien de la photopériode et de l'alimentation. L'élevage par le CFFI avec lumière constante (LO de 24:0) et alimentation à intervalles réguliers 24 h/24 vise à minimiser ces fluctuations, mais aucune publication ne présente de données sur 24 h (par exemple Davidson et coll., 2016a). Dans un cycle de durée du jour naturelle simulée (Lat. 60 °N), on observe clairement un cycle sur 24 heures de la concentration de CO₂ sur des post-saumoneaux (114 g, 75 kg/m³) élevés dans de l'eau de mer (9,3 °C), en novembre/décembre, et nourris 2 à 4 fois par jour (Kvamme et coll., 2019). Le taux d'échange d'eau du bassin est le principal facteur affectant l'ampleur de la pointe de CO₂, dont la concentration est supérieure à 20 mg/l l'après-midi à un taux d'échange (densité de chargement) de 0,2 L/kg/min. En comparaison, à 0,3 et 0,5 L/kg/min, la concentration de CO₂ atteint un pic à 11 et 7 mg/l respectivement (Kvamme et coll., 2019). De même, la concentration moyenne de CO₂ augmente progressivement quand le taux d'échange d'eau diminue de 0,5 à 0,2 L/kg/min chez des smolts élevés à 75 kg/m³, atteignant 15,7 mg/l au plus bas taux d'échange, 0,2 L/kg/min (Sveen et coll., 2016). De plus, une réponse cutanée au

stress significative est détectée à $\leq 0,3$ L/kg/min, avec une transcription accrue des gènes des mucines (Sveen et coll., 2016). Dans un SAR d'eau douce, pendant le grossissement de saumons de l'Atlantique (couche Cascade) dans des bassins de 150 m³ jusqu'à un poids supérieur à 4 kg, la concentration moyenne de CO₂ est de 13-14 mg/l, avec une densité finale de mise en charge de 100 kg/m³ et un taux d'échange de 0,33 L/kg/min (Davidson et coll., 2016a). La concentration de CO₂ varie de 2 à 24 mg/l, ce qui pourrait être stressant, mais les poissons « n'expriment aucun comportement indiquant une détérioration de bien-être » (anecdotiquement, les poissons sont distribués uniformément dans le bassin de grossissement, dociles et ne montrent pas d'agressivité dans la compétition alimentaire ni d'interactions agonistiques excessives; Davidson et coll., 2016a).

En raison de la solubilité élevée du CO₂, pour l'extraire d'H₂O, il faut une colonne de dégazage ayant un rapport eau:air forcé d'au moins 1:10 (Summerfelt et coll., 2000). Il est compliqué de mesurer le CO₂, et par conséquent d'en évaluer les effets, car il réagit avec l'eau pour faire partie de l'équilibre des carbonates (Colt et coll., 2012). Une des possibilités, qui permet une surveillance continue, consiste à employer un capteur infrarouge (OxyGuard : Moran et coll., 2010). Le titrage par NaOH jusqu'à ce que le pH du point final soit de 8,3 pour mesurer la concentration de CO₂ comporte une confusion dans un SAR en cas de coloration de l'eau causée par des acides humiques issus des aliments ou des fèces. L'eau de mer complique davantage encore la mesure du CO₂. Pour faire ressortir la complexité, Kvamme et coll. (2019) ont calculé la concentration de CO₂ en mesurant l'alcalinité totale dans l'eau à l'entrée, le pH à la sortie du bassin, la température et la salinité, qu'ils ont entrés dans une feuille de calcul Excel conçue par Raul H. Piedrahita (professeur émérite, Université de Californie, Davis) d'après des méthodes du département de l'Énergie des États-Unis (1994).

L'hypoxie, les lésions rénales et les cataractes sont trois symptômes et conséquences de l'hypercapnie influant sur le bien-être. Une concentration élevée de CO₂ dans l'eau inhibe son excrétion par diffusion du sang aux branchies. L'exposition de truites à une augmentation abrupte de CO₂ entraîne une chute rapide du pH sanguin, qui réduit considérablement la liaison de l'O₂ à l'hémoglobine, causant une hypoxémie temporaire (Eddy et coll., 1977). Toutefois, quelques heures plus tard, le pH sanguin revient à son niveau normal, ce qui s'accompagne d'une hausse marquée du bicarbonate dans le sang, qui reste chroniquement élevé. Les concentrations élevées d'HCO₃⁻ causent l'augmentation du pH de l'urine primaire, et des dépôts de sels de calcium s'accumulent dans les tubules rénaux : on parle de néphrocalcinose (Eddy et coll., 1979; Smart et coll., 1979). L'étiologie de la néphrocalcinose n'est pas complètement connue, car son incidence varie grandement d'une étude à l'autre (Mota et coll., 2019). On ne connaît pas non plus l'étiologie des cataractes dues à l'hypercapnie. On peut prévenir l'hypercapnie dans les SAR si le taux d'échange d'eau, le dégazage et la densité de mise en charge sont correctement équilibrés avec les stratégies d'alimentation. Concernant les effets sur le bien-être des fluctuations temporelles des concentrations de CO₂ et la compensation du pH sanguin dans un SAR surchargé, le manque de connaissances est encore très important, comme le soulignent Thorarensen et Farrell (2011). En conclusion, pour prévenir l'hypercapnie, il semblerait qu'un taux d'échange minimal de 0,3 L/kg/min soit important et que 10 mg/l de CO₂ soit une limite supérieure sans danger. Il serait utile de réaliser des recherches incorporant la surveillance continue du CO₂ et la mise en correspondance de ces résultats avec les indicateurs de bien-être. De plus, l'étiologie de la néphrocalcinose et des cataractes mérite d'être étudiée.

6.5 Matières solides, coloration de l'eau et ozone

Les déchets fécaux solides sont en grande partie décantables, mais certains se fragmentent en particules en suspension, qui se transforment en carbone organique dissous si elles ne sont pas retirées à l'aide de filtres mécaniques ou d'écumeurs. Plus les particules sont petites, plus leur gestion est difficile et le risque grand pour la santé des salmonidés dans des SAR. Des fèces intactes plongent rapidement au fond du bassin, sont attirées vers le centre par une force centripète et éliminées efficacement dans le drain central par un débit sortant régulier de 5-6 L d'eau/min par 1 m² de superficie au sol du bassin (Davidson et Summerfelt, 2004). Dans les tuyaux d'évacuation d'effluents de la boucle de recirculation, les matières solides continuent de poser un risque léthal si elles s'accumulent en raison d'une mauvaise conception ou d'erreurs de construction. La décomposition anaérobie des boues libère du sulfure d'hydrogène (H₂S), ce qui a provoqué plusieurs événements de mortalité élevée dans des SAR norvégiens (Dunnette et coll., 1985; Olsen, 2019). La menace potentielle est plus grande dans les SAR d'eau de mer que dans ceux d'eau douce : la production d'H₂S est respectivement de 20,5 contre 0,8 mg/g de boues (Olsen, 2019). Le nitrate, produit final de la nitrification, neutralise l'H₂S; tous deux doivent être surveillés (Neori et coll., 2007).

La composition des aliments influe grandement sur la santé intestinale et les caractéristiques viscoélastiques physiques des fèces (Brinker et coll., 2005; Gajardo et coll., 2017). Les régimes sans farine de poisson sont un objectif important, que l'industrie poursuit pour satisfaire la demande du marché en aliments durables. Les protéines végétales, particulièrement les tourteaux de soja, peuvent contenir des facteurs antinutritionnels causant des entérites et des diarrhées (Noble et coll., 2005). Ces dernières sont une source de préoccupation grave pour les exploitants de SAR, mais peuvent passer inaperçues dans un système en circuit ouvert. Un des effets immédiats de l'augmentation des matières en suspension totales de 3 à 12 mg/l était le doublement de la demande d'oxygène dans un grand bassin de smolts (Gorle et coll., 2018).

Des saumons élevés dans un SAR, auxquels est fournie une alimentation sans farine de poisson à teneur élevée en farine de noix mixte et sans soja, ont un rendement similaire à celui des témoins nourris avec un régime standard; la qualité de l'eau est similaire et aucun problème de bien-être n'est constaté, mais la santé intestinale n'a pas été évaluée (Davidson et coll., 2016b). L'industrie de l'alimentation animale commercialise des aliments pour SAR, mais n'en propose pas sans farine de poisson. À titre d'exemple, Skretting a lancé ses régimes RecircReady en 2018 et lancera en 2020 ses aliments de nouvelle génération. Un exploitant de SAR se plaignait que les matières en suspension totales (MST) pouvaient considérablement différer en fonction des types d'aliments, et même selon les lots d'un même aliment (communication personnelle à J. Duston). Afin que soient mis au point de meilleurs aliments pour SAR, y compris sans farine de poisson, des outils moléculaires et des marqueurs microbiens sont en cours de mise au point; ils permettront d'évaluer l'effet des nouveaux ingrédients alimentaires sur la santé intestinale du saumon de l'Atlantique (Gajardo et coll., 2017). La recherche sur la nutrition dans les SAR est considérée comme prioritaire tant dans une perspective de bien-être que de durabilité.

Dans les SAR, il est courant que l'eau soit brune en raison des composés d'acides humiques issus de la dégradation des aliments ou des fèces (Leonard et coll., 2002). Cette coloration limite la pénétration de la lumière, ce qui peut perturber la smoltification (B. Milligan, communication personnelle à J. Duston). Selon les recommandations, une smoltification optimale nécessite une

intensité lumineuse minimale de 43 lux (Handeland et coll., 2013b; voir la *section 7 : Éclairage*). L'ozone peut efficacement éclaircir l'eau des SAR en oxydant les matières organiques dissoutes et la microfloculation (Schroeder et coll., 2011). Son utilisation revêt une importance croissante dans la gestion des SAR (Powell et Scolding, 2018).

L'ozone apporterait à la fois des avantages et des risques pour les exploitants de SAR. Les avantages sont une désinfection extrêmement efficace, la floculation des petites particules et la réduction des produits de flaveur étrangère comme la géosmine (Gonçalves et Gagnon, 2011; Ji et coll., 2020). Parce que l'ozone est un puissant agent oxydant, il peut directement endommager les tissus des poissons, particulièrement les branchies. Il pose un autre risque plus grand encore, qui concerne les SAR d'eau de mer : la formation d'oxydants produits par l'ozone (OPO) très toxiques, particulièrement le brome libre et les bromamines (Gonçalves et Gagnon, 2011). Les oxydants produits par l'ozone sont plus stables que l'ozone et peuvent s'accumuler dans les SAR d'eau de mer s'ils ne sont pas éliminés par des méthodes comme la filtration sur charbon actif ou le rayonnement UV (Gonçalves et Gagnon, 2011). La menace qu'ils représentent est aggravée par les données fragmentaires sur leur toxicité dans les poissons; le Comité scientifique n'a pas trouvé de données traitant des effets des OPO sur le saumon de l'Atlantique. Des turbots juvéniles (*Psetta maxima* L.) exposés à des concentrations d'OPO de 0,06, 0,10 et 0,15 mg/l pendant 21 jours présentaient des lésions aux branchies à 0,10-0,15 mg/l (Reiser et coll., 2011). Dans une revue récente de la littérature, Powell et Scolding (2018) ont insisté sur la nécessité de définir des doses recommandées efficaces et des limites de tolérance pour l'ozone et les OPO dans les SAR d'eau de mer, en rappelant qu'elles seraient probablement déterminées par espèce, stade du cycle biologique ou taille corporelle. Il faut appliquer avec cohérence des méthodes de mesure exactes et pratiques dans les études et les exploitations. Buchan et coll. (2005) ont comparé cinq méthodes de mesure et recommandé une trousse d'analyse colorimétrique (DPD; N,N-diéthyl-p-phénylénédiamine). Les sondes mesurant le potentiel d'oxydoréduction (potentiel redox; millivolts) sont d'utilisation facile, mais elles ont une durée de vie courte et peuvent manquer d'exactitude (Buchan et coll., 2005). La méthode colorimétrique à l'indigo officielle de l'APHA a été employée par Gonçalves et Gagnon (2011).

6.6 Ammoniac, nitrite et nitrate

La toxicité élevée de l'azote ammoniacal non ionisé (NH_3) et du nitrite (NO_2^-) est reconnue et l'état des connaissances n'a pas changé depuis une revue de la littérature sur la question (Thorarensen et Farrell, 2011). Les exploitants de SAR savent gérer les filtres biologiques et comprennent l'importance du contrôle du pH. Le nitrate (NO_3^-), produit final de la nitrification, est relativement non toxique, mais il a récemment attiré l'attention comme nouvelle menace possible dans les SAR, car il peut s'accumuler. Chez le turbot, une concentration de nitrate de >126 à 505 mg/l inhibe la croissance de façon proportionnelle à la dose (van Bussel et coll., 2012). En comparaison, chez des post-saumoneaux, le nitrate maintenu à une concentration de 100 mg/l pendant 8 mois dans un SAR d'eau douce n'a d'effet ni sur la croissance ni sur plusieurs paramètres de santé (Davidson et coll., 2017).

6.7 Gestion de l'écosystème microbien

Pour préserver la qualité de l'eau dans les SAR, il faut une gestion habile du poisson, une série d'équipements et la contribution invisible d'une communauté microbienne complexe. La

biofiltration microbienne est essentielle à l'élimination de l'ammoniac et du nitrite, et les pisciculteurs savent parfaitement que la stabilité des filtres biologiques est cruciale pour la santé des SAR. De plus, les niveaux élevés de nutriments des SAR et les longs temps de rétention favorisent l'accumulation d'une grande variété de microbes, dans la colonne d'eau et les surfaces, qui sont tous susceptibles d'influencer la santé du poisson (Pedersen et coll., 2019). La stabilité est essentielle à la santé des écosystèmes microbiens. En effet, des modifications élémentaires de la charge de nourriture peuvent causer des perturbations (Rojas-Tirado et coll., 2018). Les agents thérapeutiques constituent la menace la plus importante. Le formol par exemple, amplement utilisé dans la salmoniculture pour le traitement d'infections topiques, peut considérablement réduire le taux de nitrification en cas d'isolation inadéquate du filtre biologique (Pedersen et coll., 2010). Des concentrations résiduelles de formol de 37 mg/l, pourtant basses, perturbent les bactéries oxydant l'ammoniac et une concentration de 10 mg/l peut perturber les bactéries oxydant les nitrites, qui sont plus sensibles (Fredricks et coll., 2018).

6.8 Références

- Bjørndal, T. et A. Tusvik (2019). Economic analysis of land based farming of salmon, *Aquaculture Economics and Management*, vol. 23(4), p. 449-475.
- Bouck, G.R. (1980). The etiology of gas bubble disease, *Transactions of the American Fisheries Society*, vol. 109(6), p. 703-707.
- Brinker, A., W. Koppe et R. Rösch (2005). Optimised effluent treatment by stabilised trout faeces, *Aquaculture*, vol. 249, p. 125-144.
- Buchan, K.A.H., D.J. Martin-Robichaud et T.J. Benfey (2005). Measurement of dissolved ozone in sea water: A comparison of methods, *Aquacultural Engineering*, vol. 33, p. 225-231.
- Colt, J., B. Watten et T. Pfeiffer (2012). Carbon dioxide stripping in aquaculture. Part 1: Terminology and reporting, *Aquacultural Engineering*, vol. 47, p. 27-37.
- Davidson, J., F.T. Barrows, P.B. Kenney, C. Good, K. Schroyer et S.T. Summerfelt (2016b). Effects of feeding a fishmeal-free versus a fishmeal-based diet on post-smolt Atlantic salmon *Salmo salar* performance, water quality, and waste production in recirculation aquaculture systems, *Aquacultural Engineering*, vol. 74, p. 38-51.
- Davidson, J., C. Good, C. Williams et S.T. Summerfelt (2017). Evaluating the chronic effects of nitrate on the health and performance of post-smolt Atlantic salmon *Salmo salar* in freshwater recirculation aquaculture systems, *Aquacultural Engineering*, vol. 79, p. 1-8.
- Davidson, J., T. Maya, C. Good, T. Waldrop, B. Kenney, B.F. Terjesend et S. Summerfelt (2016a). Production of market-size North American strain Atlantic salmon *Salmo salar* in a land-based recirculation aquaculture system using freshwater, *Aquacultural Engineering*, vol. 74, p. 1-16.
- Davidson, J. et S. Summerfelt (2004). Solids flushing, mixing, and water velocity profiles within large (10 and 150 m³) circular 'Cornell-type' dual-drain tanks, *Aquacultural Engineering*, vol. 32(1), p. 245-271.
- Dunnette, D.A., D.P. Chynoweth et K.H. Mancy (1985). The source of hydrogen sulphide in anoxic sediment, *Water Research*, vol. 19, p. 875-884.

- Duston, J. et R.L. Saunders (1995). Increased temperature during winter did not affect completion of smolting in Atlantic salmon, *Aquaculture International*, vol. 3, p. 196-204.
- Duston, J., R.L. Saunders et D.E. Knox (1991). Effects of increases in freshwater temperature on loss of smolt characteristics in Atlantic salmon *Salmo salar*, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 48(2), p. 164-169.
- Ebeling, J.M., M.B. Timmons et J.J. Bisogni (2006). Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia nitrogen in aquaculture systems, *Aquaculture*, vol. 257, p. 346-358.
- Eddy, F.B., J.P. Lomholt, R.E. Weber et K. Johansen (1977). Respiratory properties of trout (*Salmo gairdneri*) kept in water of high CO₂ tension, *Journal of Experimental Biology*, vol. 67, p. 37-47.
- Eddy, F.B., G.R. Smart et R.N. Bath (1979). Ionic content of muscle and urine in rainbow trout *Salmo gairdneri* Richardson kept in water of high CO₂ content, *Journal of Fish Diseases*, vol. (2), p. 105-110.
- Fredricks, K.T., A.R. Cupp, S.M. Schleis, R.A. Erickson et M.P. Gaikowski (2018). Effects of formaldehyde on nitrification in biofilters of small-scale recirculating systems, *Aquaculture Research*, vol. 49, p. 3207-3217.
- Gajardo, K., A. Jaramillo-Torres, T.M. Kortner, D.L. Merrifield, J. Tinsley, A-M. Bakke et A. Krogdahl (2017). Alternative protein sources in the diet modulate microbiota and functionality in the distal intestine of Atlantic salmon (*Salmo salar*), *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 83(5), n° e02615-16.
- Gamperl, A.K., O.O. Ajiboye, F.S. Zanuzzo, R.M. Sandrelli, E. de Fatima Carvalho Peroni et A. Beemelmans. (2020) The impacts of increasing temperature and moderate hypoxia on the production characteristics, cardiac morphology and haematology of Atlantic salmon (*Salmo salar*), *Aquaculture*, vol. 519, n° 734874.
- Gonçalves, A.A. et G.A. Gagnon (2011). Ozone application in recirculating aquaculture system: An overview, *Ozone Science & Engineering*, vol. 33, p. 345-367.
- Gorle, J.M.R., B.F. Terjesen, V.C. Mota et S. Summerfelt (2018). Water velocity in commercial RAS culture tanks for Atlantic salmon smolt production, *Aquacultural Engineering*, vol. 81, p. 89-100.
- Handeland, S.O., A.K. Imsland, B.Th. Björnsson et S.O. Stefansson (2013a). Long-term effects of photoperiod, temperature and their interaction on growth, gill Na⁺, K⁺-ATPase activity, seawater tolerance and plasma growth-hormone levels in Atlantic salmon *Salmo salar*, *Journal of Fish Biology*, vol. 83(5), p. 1197-1209.
- Handeland, S.O., A.K. Imsland, L.O.E. Ebbesson, T.O. Nilsen, C.D. Hosfeld, G. Baeverfjord, Å. Espmark, T. Rosten, O.T. Skilbrei, T. Hansen, G.S. Gunnarsson, O. Breck et S.O. Stefansson (2013b). Low light intensity can reduce Atlantic salmon smolt quality, *Aquaculture*, vol. 384-387, p. 19-24.

Handeland, S.O., A.K. Imsland et S.O. Stefansson (2008). The effect of temperature and fish size on growth, feed intake, food conversion efficiency and stomach evacuation rate of Atlantic salmon post-smolts, *Aquaculture*, vol. 283, p. 36-42.

Hosfeld, C.D., S.O. Handeland, S. Fivelstad et S.O. Stefansson (2010). Physiological effects of normbaric environmental hyperoxia on Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) presmolts, *Aquaculture*, vol. 308, p. 28-33.

Ji, M., K. Wu, J. Li, Z. Ye, H. Li et S. Zhu (2020). The effect of ozonation on particle size distribution for recirculating aquacultural seawater: Analysis of particle flocculation and breakup, *Ozone Science & Engineering*, vol. 42, p. 157-167.

Johansson, D., K. Ruohonen, A. Kiessling, F. Oppedal, J-E. Stiansen, M. Kelly et J-E. Juell (2006). Effect of environmental factors on swimming depth preferences of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) and temporal and spatial variations in oxygen levels in sea cages at a fjord site, *Aquaculture*, vol. 254, p. 594-605.

Johnston, C.E. et R.L. Saunders (1981). Parr-smolt transformation of yearling Atlantic salmon (*Salmo salar*) at several rearing temperatures, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 38, p. 1189-1198.

Kvamme, K., S. Fivelstad, S.O. Handeland et A. Bergheim (2019). Water flow and diurnal variation in metabolite production rates of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) post-smolt, *Aquaculture Research*, vol. 50(1), p. 323-330.

Leonard, N., J.P. Guiraud, E. Gasset, J.P. Cailleres et J.P. Blancheton (2002). Bacteria and nutrients-nitrogen and carbon-in a recirculating system for sea bass production, *Aquacultural Engineering*, vol. 26(2), p. 111-127.

Moran, D., B. Tirsgård et J.F. Steffensen (2010). The accuracy and limitations of a new meter used to measure aqueous carbon dioxide, *Aquacultural Engineering*, vol. 43(3), p. 101-107.

Moran, D., L. Tubbs et J.G. Støttrup (2012). Chronic CO₂ exposure markedly increases the incidence of cataracts in juvenile Atlantic cod *Gadus morhua* L, *Aquaculture*, vol. 364-365, p. 212-216.

Mota, V.C., T.O. Nilsen, J. Gerwins, M. Gallo, E. Ytteborg, G. Baeverfjord, J. Kolarevic, S.T. Summerfelt et B.F. Terjesen (2019). The effects of carbon dioxide on growth performance, welfare, and health of Atlantic salmon post-smolt (*Salmo salar*) in recirculating aquaculture systems, *Aquaculture*, vol. 498, p. 578-586.

Neori, A., M.D. Krom et J. van Rijn (2007). Biogeochemical processes in intensive zero-effluent marine fish culture with recirculating aerobic and anaerobic biofilters, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, vol. 349, p. 235-247.

Noble, A.C., M.M. Garner et R.W. Nordhausen (2005). Chronic diarrhea in Arctic char (*Salvelinus alpinus*) cultured in a semi-enclosed recirculation system, *Bulletin European Association of Fish Pathologists*, vol. 25, p. 248-255.

Olsen, R.E. (2019). Bakgrunnsnivåer av hydrogensulfid I RAS, produksjon av hydrogensulfid fra fiskeslam ved ulike saliniteter, og effekten av å tilsette nitrat, thèse de maîtrise en sciences, 37 p.

(résumé en anglais) <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2618086/no.ntnu>.

Pedersen, L-F., P.B. Pedersen, J.L. Nielsen et P.H. Nielsen (2010). Long term/low dose formalin exposure to small-scale recirculation aquaculture systems, *Aquacultural Engineering*, vol. 42(1), p. 1-7.

Pedersen, L-F., P. Rojas-Tirado, E. Arvin et P.B. Pedersen (2019). Assessment of microbial activity in water based on hydrogen peroxide decomposition rates, *Aquacultural Engineering*, vol. 85, p. 9-14.

Powell, A. et J.W.S. Scolding (2018). Direct application of ozone in aquaculture systems, *Reviews in Aquaculture*, vol. 10(2), p. 424-438.

Reiser, S., S. Wuertz, J.P. Schroeder, W. Kloas et R. Hanel (2011). Risks of seawater ozonation in recirculation aquaculture – effects of oxidative stress on animal welfare of juvenile turbot (*Psetta maxima* L.), *Aquatic Toxicology*, vol. 105, p. 508-517.

Remen, M., F. Oppedal, A.K. Imsland, R.E. Olsen et T. Torgersen (2013). Hypoxia tolerance thresholds for post-smolt Atlantic salmon: Dependency of temperature and hypoxia acclimation, *Aquaculture*, vol. 416-417, p. 41-47.

Remen, M., F. Oppedal, T. Torgersen, A.K. Imsland et R.E. Olsen (2012). Effects of cyclic environmental hypoxia on physiology and feed intake of post-smolt Atlantic salmon: Initial responses and acclimation, *Aquaculture*, vol. 326-329, p. 148-155.

Rojas-Tirado, P., P.B. Pedersen, O. Vadstein et L-F. Pedersen (2018). Changes in microbial water quality in RAS following altered feed loading, *Aquacultural Engineering*, vol. 81, p. 80-88.

Sambras, F., R.E. Olsen, M. Remen, T.J. Hansen, T. Torgersen et P.G. Fjellidal (2017). Water temperature and oxygen: The effect of triploidy on performance and metabolism in farmed Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) post-smolts, *Aquaculture*, vol. 473, p. 1-12.

Schroeder, J.P., P.L. Croot, B. Von Dewitz, U. Waller et R. Hanel (2011). Potential and limitation of ozone for the removal of ammonia, nitrite, and yellow substances in marine recirculating aquaculture systems, *Aquacultural Engineering*, vol. 45, p. 35-41.

Sigholt, T., T. Åsgård et M. Staurnes (1998). Timing of parr-smolt transformation in Atlantic salmon (*Salmo salar*): Effects of changes in temperature and photoperiod, *Aquaculture*, vol. 160, p. 129-144.

Smart, G.R., D. Knox, J.G. Harrison, J.A. Ralph, R.H. Richards et C.B. Cowey (1979). Nephrocalcinosis in rainbow trout *Salmo gairdneri* Richardson; the effect of exposure to elevated CO₂ concentrations, *Journal of Fish Diseases*, vol. 2(4), p. 279-289.

Solbakken, V.A., T. Hansen et S.O. Stefansson (1994). Effects of photoperiod and temperature on growth and parr-smolt transformation in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) and subsequent performance in seawater, *Aquaculture*, vol. 121, p. 13-27.

- Song, X., Y. Liu, J.B. Pettersen, M. Brando, X. Ma, S. Røberg et B. Frostell (2019). Life cycle assessment of recirculating aquaculture systems: A case of Atlantic salmon farming in China, *Journal of Industrial Ecology*, vol. 23(5), p. 1077-1086.
- Stefansson, S.O., Å.I. Berge et G.S. Gunnarsson (1998). Changes in seawater tolerance and gill Na^+, K^+ -ATPase activity during desmoltification in Atlantic salmon kept in freshwater at different temperatures, *Aquaculture*, vol. 168, p. 271-277.
- Stehfest, K.M., C.G. Carter, J.D. McAllister, J.D. Ross et J.M. Semmens (2017). Response of Atlantic salmon *Salmo salar* to temperature and dissolved oxygen extremes established using animal-borne environmental sensors, *Science Reports*, vol. 7, n° 4545.
- Summerfelt, S.T., B.J. Vinci et R.H. Piedrahita (2000). Oxygenation and carbon dioxide control in water reuse systems, *Aquacultural Engineering*, vol. 22, p. 87-108.
- Sveen, L.R., G. Timmerhaus, J.S. Torgersen, E. Ytteborg, S.M. Jørgensen, S. Handeland, S.O. Stefansson, T.O. Nilsen, S. Calabrese, L. Ebbesson, B.F. Terjesen et H. Takle (2016). Impact of fish density and specific water flow on skin properties in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) post-smolts, *Aquaculture*, vol. 464, p. 629-637.
- Thorarensen, H. et A.P. Farrell (2011). The biological requirements for post-smolt Atlantic salmon in closed-containment systems, *Aquaculture*, vol. 312, p. 1-14.
- van Bussel, C.G.J., J.P. Schroeder, S. Wuertz et C. Schulz (2012). The chronic effect of nitrate on production performance and health status of juvenile turbot (*Psetta maxima*), *Aquaculture*, vol. 326-329, p. 163-167.
- van Rijn, C.A., P.L. Jones, B.S. Evans, C. Huynh, S.D. McCormick et L.O.B. Afonso (2020). Characterization of smoltification in the Tasmanian strain of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in recirculation and flow-through systems, *Aquaculture*, vol. 516, p. 1-10.
- Zanuzzo, F.S., A. Beemelmans, J.R. Hall, M.L. Rise et A.K. Gamperl (2020). The innate immune response of Atlantic salmon (*Salmo salar*) is not negatively affected by high temperature and moderate hypoxia, *Frontiers in Immunology*, vol. 11, n° 1009.

7 Éclairage

Conclusions :

1. **Un éclairage continu en lumière constante (LL) pendant 24 heures est utilisé à certaines étapes du cycle de vie des truites et des saumons d'élevage. Cet éclairage est particulièrement important pour le secteur du saumon de l'Atlantique. De très nombreuses données prouvent les avantages de la LL, tandis que les effets négatifs semblent mineurs d'après les données probantes.**
2. **En général, les œufs et les alevins sont couvés dans des plateaux d'incubateurs verticaux ou des incubateurs à courant ascendant dans des pièces éclairées au plafond, en continu, par une lumière blanche d'intensité supérieure à 100 lux. Cependant, l'intensité lumineuse dans chaque plateau est très faible (<5 lux) afin que la survie soit optimale. L'exposition hebdomadaire de chaque plateau à une lumière vive pendant quelques minutes est nécessaire à l'inspection sanitaire visuelle et la récolte des œufs morts.**
3. **On élève les alevins qui commencent juste à se nourrir sous une lumière constante afin de maintenir le poisson dans la colonne d'eau et d'éviter le risque de suffocation nocturne causée par le fait que les poissons se déposent sur le fond du bassin et sont attirés vers le tamis du drain de sortie.**
4. **Aux fins de stabilisation du cycle de production saisonnier des smolts de saumon de l'Atlantique, des systèmes de durées du jour (photopériodes) comportant une lumière constante pendant plusieurs mois sont courants.**
5. **Pour empêcher la maturation sexuelle non souhaitée et la détérioration de santé connexe chez les grands saumons de l'Atlantique, on éclaire les cages marines en lumière constante pendant plusieurs mois l'hiver.**
6. **Pour réduire le risque d'infestation par le pou du poisson, des projecteurs immergés éclairent en lumière constante le fond des cages marines de façon à réduire le risque de contact entre les parasites et le saumon de l'Atlantique.**
7. **Les installations de production d'œufs produisent jusqu'à trois récoltes par an, voire plus, en maintenant le stock de géniteurs dans des bassins qui ne laissent pas pénétrer la lumière avec un cycle simulé de photopériodes de 12 mois, déphasé par rapport au cycle de durée du jour naturel.**

7.1 Vue d'ensemble

La lumière a trois qualités – couleur, intensité et durée (durée du jour ou photopériode) – toutes susceptibles d'influer sur le bien-être animal. Dans les régions tempérées, le cycle biologique de la plupart des organismes est entraîné par le cycle quotidien de l'intensité de la lumière et le cycle annuel des photopériodes, la température servant de facteur déterminant pour les animaux poïkilothermes. La salmoniculture utilise abondamment la manipulation des photopériodes pour améliorer les premières prises alimentaires, modifier le moment de la smoltification et de la maturation sexuelle, et réduire l'incidence d'une maturation sexuelle non souhaitée. En général, on utilise un éclairage blanc en spectre continu ordinaire doté de diodes électroluminescentes

(DEL), qui permet aux chercheurs de commencer à étudier les effets de la couleur. L'intensité lumineuse doit être suffisante pour que les poissons voient leur nourriture dans toute la profondeur de l'unité d'élevage, mais une intensité élevée peut être source de stress. La photopériode est l'élément le plus déterminant et il peut servir à manipuler l'état physiologique des salmonidés à tous les stades de leur cycle biologique. L'application de la manipulation des photopériodes à la salmoniculture était un des sujets de recherche les plus en vogue il y a 15-20 ans, comme le montrent les références citées ici, et elle est aujourd'hui un outil établi dans l'industrie. Il reste toutefois des questions sans réponse. Il faudrait notamment étudier davantage l'éclairage adéquat pour les bassins terrestres profonds, le taux de transition entre durées du jour artificielles et naturelles, et l'éclairage réduisant l'infestation par le pou du poisson.

La présente revue de la littérature décrit l'utilisation de la manipulation de l'éclairage dans l'élevage de saumons de l'Atlantique (*Salmo salar*) dans l'ordre des étapes, du stade d'œuf au stade adulte, pour expliquer les avantages et les préoccupations en matière de bien-être étayés par des données empiriques. Les problèmes de bien-être perçus ou potentiels susceptibles de préoccuper le public sont également indiqués. Des renseignements sur d'autres espèces que les salmonidés d'élevage sont donnés, quand des données probantes montrent des différences avec le saumon de l'Atlantique.

7.2 Incubation des œufs et alevins

Les œufs de saumon sauvage se développent dans l'obscurité, enterrés dans des frayères en gravier (Crisp et Carling, 1989). Les pratiques classiques des écloséries s'en inspirent : l'incubation des œufs de saumon dans l'obscurité donne de meilleurs résultats de survie et des alevins plus grands qu'en cas d'incubation à la lumière (Bell et Hoar, 1950; Eisler, 1957). Toutefois, l'obscurité complique la gestion des œufs. Il faut en effet vérifier régulièrement les mortalités et prélever les œufs morts ou les désinfecter. Les œufs morts sont vite infectés par *Saprolegnia* spp., qui peuvent rapidement tuer tout le lot d'œufs (Thoen et coll., 2011). Si certaines écloséries continuent l'incubation dans l'obscurité, la plupart des écloséries modernes de saumon de l'Atlantique opèrent en lumière constante 24 h/24 (LL); les œufs sont couvés dans des incubateurs verticaux à plateaux à étages Heath, ou une nouvelle version dénommée CompHatch (Alvestad Marin AS, Norvège). Chaque plateau contient environ 10 000 œufs qui sont exposés à une lumière indirecte de faible intensité (<5 lux). Les vérifications sanitaires visuelles et le retrait d'œufs sont réalisés après glissement manuel de chaque plateau, ce qui expose les œufs à la lumière au plafond de la pièce. Jusqu'à l'éclosion et la résorption du sac vitellin, les alevins restent sous une lumière constante dans des plateaux Heath ou dans des bassins peu profonds équipés au sol de substrat artificiel, au-dessus ou en dessous duquel les poissons se rassemblent (Peterson et Martin-Robichaud, 1995). Cette méthode d'écloserie vise à stabiliser les conditions, maximiser la résorption du sac vitellin et minimiser les mouvements des alevins demandant une dépense inutile d'énergie.

7.3 Alevins nageants, alevins commençant à se nourrir et tacons

Quand la résorption du sac vitellin est presque terminée, les alevins nagent vers le haut, environ 750 degrés-jours après la fécondation (stock de la rivière Saint-Jean par exemple; Peterson et Martin-Robichaud, 1995). À ce stade, les poissons sont généralement élevés dans des bassins circulaires peu profonds. Il est important qu'ils soient continuellement éclairés aux premières

étapes de nage vers le haut pour qu'ils continuent de nager activement dans la colonne d'eau. Si les lumières sont éteintes, les alevins restent dans le fond du bassin et risquent d'être attirés dans le tamis du drain central du bassin et d'alors suffoquer. Quand ils commencent à consommer de la nourriture, la lumière constante maintient les poissons dans la colonne d'eau et permet une alimentation continue. Quand ils grossissent et deviennent de meilleurs nageurs, le risque de suffocation diminue et ils peuvent sans danger être élevés dans un cycle lumière-obscurité, mais la plupart des écloséries conservent la lumière constante pour maximiser l'alimentation et la croissance. Autour du solstice d'été, dans des conditions naturelles, les alevins de saumon de l'Atlantique sauvage vivent une durée du jour de 17 à 24 heures selon la latitude. Une longue photopériode prolonge l'activité de recherche de nourriture des salmonidés, qui sont des prédateurs visuels, mais elle déclenche aussi la sécrétion d'une hormone de croissance qui stimule l'appétit et la croissance (Björnsson et coll., 1989; Peter et Marchant, 1995). Le poids corporel de saumons de l'Atlantique maintenus sous lumière constante (~500 lux à la surface de l'eau) pendant trois mois à partir de leur première consommation de nourriture est de 20 % supérieur à celui d'alevins élevés en cycle lumière-obscurité 6:8 ou 12:12, sans qu'aucun problème de bien-être n'ait été observé (Saunders et Henderson, 1988). De même, en Norvège, les taux de croissance sont significativement plus élevés chez des saumons de l'Atlantique juvéniles élevés pendant quatre mois sous lumière constante que chez ceux élevés sous 16 heures de lumière et 8 heures d'obscurité (LO de 16:8). La concentration de cortisol plasmatique est similaire dans les deux traitements, ce qui laisse supposer que la lumière constante n'est pas un facteur de stress (Stefansson et coll., 1989). Les effets délétères d'une photopériode inchangée sont évidents quand celle-ci est prolongée au-delà de trois mois, et interfère alors avec l'achèvement de la smoltification (Stefansson et coll., 1989; voir la *section 7.4 : Smoltification*).

7.4 Smoltification

La transformation de tacon à smolt comprend des changements morphologiques, comportementaux et physiologiques complexes (Hoar, 1976; Björnsson et coll., 2011). L'âge de smoltification dépend de la taille corporelle, variant de cinq années dans des rivières froides non productives à moins d'un an dans une aquaculture intensive avec réglage thermique et aliments de grande qualité. La photopériode est un facteur important du contrôle du moment de la smoltification : elle sert à entraîner une horloge circannuelle sous-jacente (Eriksson et Lundqvist, 1982; Duston et Saunders, 1990). La diminution naturelle de la photopériode en automne est importante dans le lancement de la smoltification, et l'augmentation printanière de la photopériode entraîne l'achèvement du processus, la modification la plus importante étant le développement de la tolérance à la salinité. La smoltification n'arrive pas à son terme quand les poissons sont élevés sous lumière constante pendant tout l'automne et le printemps (McCormick et coll., 1987). La survie dans des essais de la tolérance à la salinité de 96 heures en mai est de 0 % chez les poissons élevés en lumière constante pendant l'automne et l'hiver, par rapport à une survie de 100 % chez les poissons élevés dans un cycle simulé de durée du jour naturelle (McCormick et coll., 1987). Manifestement, le fait que l'utilisation inadéquate de la lumière constante perturbe la smoltification constitue un problème de bien-être, mais plus de 30 ans se sont écoulés depuis cette découverte, et l'industrie sait que le moment et la durée des traitements à lumière constante doivent être équilibrés par une photopériode courte.

La modification du moment de la smoltification pour qu'elle se produise à d'autres périodes que la fenêtre normale de mai est une stratégie importante d'optimisation de l'efficacité de la

production. La production de smolts de moins d'un an hors saison en automne/hiver est courante en Colombie-Britannique, mais moins dans le Canada atlantique où la température hivernale de l'eau de mer est trop basse pour le transfert des smolts. Une manipulation de photopériode typique se caractérise par une période de lumière constante de la première consommation de nourriture jusqu'à un poids d'environ 30-50 g, suivie de la vaccination et d'une courte photopériode lumière-obscurité de 12:12 pendant 5 à 12 semaines, avant un retour à la lumière constante. Le poisson perçoit la diminution de la photopériode comme étant l'hiver et le retour à la lumière constante comme un indice de printemps, qui correspond à la fin de la smoltification : il est ainsi en mesure de tolérer un transfert dans des cages marines environ six semaines après le retour à la lumière constante. Cette production accélérée de smolts nécessite une croissance rapide à température élevée, ce qui est susceptible d'accroître l'incidence de déformations rachidiennes (Fjellidal et coll., 2006). Par la suite, il a été déterminé que ce problème de bien-être était causé par une carence alimentaire en phosphore, sujet qui reste une priorité de la recherche (par exemple Sambraus et coll., 2020). L'achèvement de la smoltification est évalué par divers essais biochimiques et physiologiques, y compris des essais d'exposition à différents milieux salins ainsi que des mesures directes et indirectes de l'activité de la pompe sodium-potassium ($\text{Na}^+\text{K}^+\text{ATPase}$) des branchies. La durée du jour absolue n'est pas le facteur critique, qui serait plutôt le passage d'une photopériode longue à une courte, puis de courte à longue (Duston et Saunders, 1995). À Terre-Neuve, la manipulation des photopériodes sert à retarder la smoltification jusqu'à juin quand l'eau de mer se réchauffe au-dessus de 4 °C (J. Nickerson, Cooke Aquaculture, et A. Borchardt, Mowi, communication personnelle).

Pour obtenir une smoltification normale, il est recommandé que l'intensité lumineuse de la durée du jour à la surface de l'eau soit supérieure à 20-40 lux. Des intensités moindres sont associées à une croissance médiocre et à l'augmentation des déformations (Handeland et coll., 2013). Dans les bassins d'élevage peu profonds, l'intensité lumineuse à la surface de l'eau se rapproche de ce que les poissons détectent. Dans les grands bassins, communs dans les écloseries modernes, l'intensité de la lumière au fond du bassin peut être sous-optimale en raison de l'ombre causée par les poissons (B. Milligan, observation personnelle). La composition spectrale de l'éclairage n'a d'effet ni sur la croissance ni sur la smoltification. Notons toutefois que les lumières mises à l'essai se limitaient à différentes teintes de blanc ou de jaune (Stefansson et Hansen, 1989). En général, les écloseries sont équipées d'un éclairage blanc à incandescence, fluorescent ou DEL.

7.5 Cages marines (phase marine)

7.5.1 Empêcher la maturation sexuelle

Depuis près de 20 ans, afin de réduire le problème de la maturation sexuelle se produisant avant la taille de récolte, les aquaculteurs placent des éclairages artificiels dans les parcs en filet marins de saumons de l'Atlantique. La maturation sexuelle après un hiver passé en mer chez le madeleineau (dit aussi saumon unibermarin ou grilse) entraîne des pertes coûteuses en matière de croissance et de qualité de la chair, car l'énergie est détournée vers le développement gonadique (McClure et coll., 2007). De plus, la maturation sexuelle peut représenter un risque pour le bien-être, car les poissons sont plus vulnérables aux agents pathogènes en raison de la suppression du système immunitaire (Suzuki et coll., 1997). En Norvège, la maturation des smolts récemment transférés dans des cages marines est un problème relativement nouveau, qui serait influencé par la photopériode et la température d'élevage pendant le stade en eau douce (Fjellidal et coll.,

2011). Le problème de la maturation précoce est aggravé par le passage de l'industrie à des smolts plus grands en vue de réduire la durée d'élevage en eau de mer et les risques d'infection par le pou du poisson connexes. L'âge à la maturité des salmonidés est inversement lié à la taille corporelle (Hutchings et Jones, 1998). Parce que l'incidence de la maturité précoce est nettement plus élevée chez les salmonidés mâles que femelles, le secteur de la truite arc-en-ciel préfère des élevages contenant seulement des femelles ou des triploïdes (voir la *section 8 : Poissons non reproducteurs, reproduction induite et modification génétique*). Au Canada, l'industrie du saumon de l'Atlantique élève principalement des diploïdes. Étant donné que l'héritabilité de l'âge de la maturité est faible chez le saumon de l'Atlantique, les programmes de sélection éprouvent des difficultés à résoudre le problème des madeleineaux (Gutierrez et coll., 2015).

Il est possible d'empêcher la maturation par une lumière constante (LL) blanche de haute intensité pendant 4 à 6 mois pendant le premier hiver des poissons en eau de mer (Hansen et coll., 1992; Taranger et coll., 1998, 2010). La lumière permanente perturbe la perception du moment de l'année par les poissons, arrêtant ainsi leur maturation sexuelle (Taranger et coll., 2010). La procédure normalisée d'utilisation de la lumière constante est tirée de la découverte par Hansen et coll. (1992) selon laquelle l'emploi d'une lumière constante d'octobre à juin réduit considérablement l'incidence de la maturation par rapport à des témoins élevés en lumière naturelle en Norvège. Dans les systèmes terrestres, le taux de maturité du saumon de l'Atlantique est significativement inférieur chez les poissons élevés sous lumière constante comparativement à ceux élevés avec une longue photopériode et une période d'obscurité de 4 à 6 heures (7,5 % sous LL par rapport à 25 % sous LO 20:4, Berg et coll., 1996; 27 % sous LL par rapport à 41 % sous LO 18:6, Good et coll., 2016). Aucun problème de bien-être causé par la lumière constante n'a été observé. Elle peut inhiber le développement osseux du saumon de l'Atlantique, mais le risque de déformation rachidienne est négligeable en cas d'alimentation contenant suffisamment de phosphore (Wargelius et coll., 2009; Fjellidal et coll., 2012). Au contraire, les saumons des élevages terrestres avec lumière constante ont un meilleur coefficient de condition et une incidence plus faible d'anomalies cardiaques que les poissons élevés dans un cycle lumière-obscurité de 20:4 (Berg et coll., 1996).

7.5.2 Éviter les poux du poisson

Les poux du poisson constituent une menace majeure pour la santé des saumons de l'Atlantique en cages marines. Or, ils se répartissent relativement haut dans la colonne d'eau. C'est pourquoi le risque de contact entre les saumons et les stades copépodites infectieux ainsi que le risque d'infection peuvent être réduits par l'utilisation de parcs en filet profonds et d'un éclairage immergé en lumière constante attirant les poissons vers le fond (Juell et coll., 2003; Stien et coll., 2014; Frenzl et coll., 2014). Cet éclairage profite à la fois à la santé et au bien-être des poissons.

7.6 Manipuler le moment de la reproduction par les photopériodes

L'utilisation de l'éclairage aux fins de manipulation du moment de la reproduction a été essayée pour la première fois sur des ombles de fontaine (Hoover et Hubbard, 1937). Depuis, on a montré que la fraie d'espèces nombreuses et variées réagit à la photopériode, phénomène la plupart du temps étudié sur les salmonidés (Bromage et coll., 2001). Le régime le plus fiable de production de gamètes de qualité est un cycle photopériodique de 12 mois déphasé du cycle naturel de la durée du jour (par exemple un cycle déphasé de 6 mois : jour le plus long le

21 décembre et jour le plus court le 21 juin). Les tentatives d'accélération de la maturation du saumon de l'Atlantique et de la truite arc-en-ciel donnent des œufs plus petits et réduisent la survie (Duston et Bromage, 1988; Taranger et coll., 1998). Étant donné que le processus de développement gonadique des salmonidés prend environ 12 mois, le poisson maintenu dans un cycle photopériodique de 12 mois permet la chronologie normale de la maturation. Les installations d'élevage de stocks de géniteurs ne laissant pas passer la lumière sont terrestres et obtiennent généralement jusqu'à trois populations de reproducteurs par an. Pour que la qualité des gamètes soit garantie, tous les aspects de la gestion de stock de géniteurs doivent respecter les normes de bien-être les plus strictes, car de nombreux facteurs de stress potentiels peuvent perturber le processus de maturation (Schreck, 2010).

7.7 Références

- Bell, G.M et W.S. Hoar (1950). Some effects of ultra-violet radiation on sockeye salmon eggs and alevins, *Canadian Journal of Research D*, vol. 28, p. 35-43.
- Berg, A.J., T. Sigholt, A. Seland et A. Danielsberg (1996). Effect of stocking density, oxygen level, light regime and swimming velocity on the incidence of sexual maturation in adult Atlantic salmon (*Salmo salar*), *Aquaculture*, vol. 143, p. 43-59.
- Björnsson, B.T., H. Thorarensen, T. Hirano, T. Ogasawara et J.B. Kristinsson (1989). Photoperiod and temperature affect plasma growth hormone levels, growth, condition factor and hypoosmoregulatory ability of juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*), *Aquaculture*, vol. 82(1-4), p. 77-91.
- Björnsson, B.T., S.O. Stefansson et S.D. McCormick (2011). Environmental endocrinology of salmon smoltification, *General and Comparative Endocrinology*, vol. 170, p. 290-298.
- Bromage, N., M. Porter et C. Randall (2001). The environmental regulation of maturation in farmed finfish with special reference to the role of photoperiod and melatonin, *Aquaculture*, vol. 197, p. 63-98.
- Crisp, D.T. et P.A. Carling (1989). Observations on siting, dimensions and structure of salmonid redds, *Journal of Fish Biology*, vol. 34, p. 119-134.
- Duston, J. et Bromage, N. (1988). The entrainment and gating of the endogenous circannual rhythm of reproduction in the female rainbow trout (*Salmo gairdneri*), *Journal of Comparative Physiology A*, vol. 164, p. 259-268.
- Duston, J. et R.L. Saunders (1990). The entrainment role of photoperiod on hypoosmoregulatory and growth related aspects of smoltification in Atlantic salmon (*Salmo salar*), *Canadian Journal of Zoology*, vol. 68, p. 707-715.
- Duston, J. et R.L. Saunders (1995). Advancing smolting to autumn in age 0+ Atlantic salmon by photoperiod, and long-term performance in sea water, *Aquaculture*, vol. 135, p. 295-309.
- Eisler, R. (1957). Some effects of artificial light on salmon eggs and larvae, *Transactions of the American Fisheries Society*, vol. 87, p. 151-162.
- Eriksson, L.O. et H. Lundqvist (1982). Circannual rhythms and photoperiod regulation of growth and smolting in Baltic salmon (*Salmo salar* L.), *Aquaculture*, vol. 28, p. 113-121.

Fjelldal, P.G., E-J. Lock, G. Grotmol, G.K. Totland, U. Nordgarden, G. Flik et T. Hansen (2006). Impact of smolt production strategy on vertebral growth and mineralisation during smoltification and the early seawater phase in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.), *Aquaculture*, vol. 261, p. 715-728.

Fjelldal, P.G., T. Hansen et T. Huang (2011). Continuous light and elevated temperature can trigger maturation both during and immediately after smoltification in male Atlantic salmon (*Salmo salar*), *Aquaculture*, vol. 321, p. 93-100.

Fjelldal, P.G., T. Hansen et S. Albrektsen (2012). Inadequate phosphorus nutrition in juvenile Atlantic salmon has a negative effect on long-term bone health, *Aquaculture*, vol. 334-337, p. 117-123.

Frenzl, B., L.H. Stien, D. Cockerill, F. Oppedal, R.H. Richards, A.P. Shinn, J.E. Bron et H. Migaud (2014). Manipulation of farmed Atlantic salmon swimming behaviour through the adjustment of lighting and feeding regimes as a tool for salmon lice control, *Aquaculture*, vol. 424-425, p. 183-188.

Good, C., G.M. Weber, T. May, J. Davidson et S. Summerfelt (2016). Reduced photoperiod (18 h light vs. 24 h light) during first-year rearing associated with increased early male maturation in Atlantic salmon *Salmo salar* cultured in a freshwater recirculation aquaculture system, *Aquaculture Research*, vol. 47, p. 3023-3027.

Gutierrez, A.P., M. José, J.M. Yáñez, S. Fukui, B. Swift et W.S. Davidson (2015). Genome-wide association study (GWAS) for growth rate and age at sexual maturation in Atlantic salmon (*Salmo salar*), *PLoS ONE*, vol. 10(3), n° e0119730.

Handeland, S.O., A.K. Imsland, L.O.E. Eddesson, T.O. Nilsen, C.D. Hosfeld, G. Baeverfjord, Å. Espmark, T. Rosten, O.T. Skilbrei, T. Hansen, G.S. Gunnarsson, O. Breck et S.O. Stefansson (2013). Low light intensity can reduce Atlantic salmon smolt quality, *Aquaculture*, vol. 384-387, p. 19-24.

Hansen, T., S. Stefansson et G.L. Taranger (1992). Growth and sexual maturation in Atlantic salmon, *Salmo salar* L., reared in sea cages at two different light regimes, *Aquaculture and Fisheries Management*, vol. 23, p. 275-280.

Hoar, W.S. (1976). Smolt transformation: evolution, behavior, and physiology, *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, vol. 3, p. 1234-1252.

Hoover, E. et H. Hubbard (1937). Modification of the sexual cycle in trout by control of light, *Copeia*, vol. 1937(4), p. 206-210.

Hutchings, J.A. et M.E.B. Jones (1998). Life-history variation and growth rate thresholds for maturity in Atlantic salmon, *Salmo salar*, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 55(Suppl. 1), p. 22-47.

Juell, J.E., F. Oppedal, K. Boxaspen et G.L. Taranger (2003). Submerged light increases swimming depth and reduces fish density of Atlantic salmon *Salmo salar* L. in production cages, *Aquaculture Research*, vol. 34, p. 469-477.

- Liu Q., A.H. Manning et J. Duston (2019). Light intensity and suppression of nocturnal plasma melatonin in Arctic charr (*Salvelinus alpinus*), *Comparative Biochemistry and Physiology Part A*, vol. 228, p. 103-106.
- McClure, C.A., K.L. Hammell, M. Moore, I.R. Dohoo et H. Burnley (2007). Risk factors for early sexual maturation in Atlantic salmon in seawater farms in New Brunswick and Nova Scotia, Canada, *Aquaculture*, vol. 272, p. 370-379.
- McCormick, S.D., R.L. Saunders, E.B. Henderson et P.R. Harmon (1987). Photoperiod control of parr-smolt transformation in Atlantic salmon (*Salmo salar*): Changes in salinity tolerance, gill Na⁺K⁺ATPase activity and plasma thyroid hormones, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 44, p. 1462-1468.
- Peter, R.E. et T.A. Marchant (1995). The endocrinology of growth in carp and related species, *Aquaculture*, vol. 129, p. 299-321.
- Peterson, R.H. et D.J. Martin-Robichaud (1995). Yolk utilization by Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) alevins in response to temperature and substrate, *Aquacultural Engineering*, vol. 14, p. 85-99.
- Sambraus, F., T. Hansen, B.S. Daae, A. Thorsen, R. Sandvik, L.H. Stien, T.W.K. Fraser et P.G. Fjellidal (2020). Triploid Atlantic salmon *Salmo salar* have a higher dietary phosphorus requirement for bone mineralization during early development, *Journal of Fish Biology*, vol. 97, p. 137-147.
- Saunders, R.L. et E.B. Henderson (1988). Effects of constant day length on sexual maturation and growth of Atlantic salmon (*Salmo salar*) parr, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 45, p. 60-64.
- Schreck, C.B. (2010). Stress and fish reproduction: the roles of allostasis and hormesis, *General and Comparative Endocrinology*, vol. 165, p. 549-556.
- Stefansson, S.O. et T.J. Hansen (1989). The effect of spectral composition on growth and smolting in Atlantic salmon (*Salmo salar*) and subsequent growth in sea cages, *Aquaculture*, vol. 82, p. 155-162.
- Stefansson, S.O., G. Naevdal et T. Hansen (1989). The influence of three unchanging photoperiods on growth and parr-smolt transformation in Atlantic salmon, *Salmo salar*, *Journal of Fish Biology*, vol. 35, p. 237-247.
- Stien, L.H., J.E. Fosseidengen, M.E. Malm, H. Sveier, T. Torgensen, D.W. Wright et F. Oppedal (2014). Low intensity light of different colours modifies Atlantic salmon depth use, *Aquacultural Engineering*, vol. 62, p. 42-48.
- Suzuki, Y., T. Otaka, S. Sato, Y.Y. Hou et K. Aida (1997). Reproduction related immunoglobulin changes in rainbow trout, *Fish Physiology and Biochemistry*, vol. 17, p. 415-421.
- Taranger, G.L., C. Haux, S.O. Stefansson, B.T. Björnsson, B.T. Walther et T. Hansen (1998). Abrupt changes in photoperiod affect age at maturity, timing of ovulation, and plasma

testosterone and oestradiol-17 β profiles in Atlantic salmon, *Salmo salar*, *Aquaculture*, vol. 162, p. 85-98.

Taranger, G.L., M. Carrillo, R.W. Schulz, P. Fontaine, S. Zanuy, A. Felip, F.A. Weltzien, S. Dufour, Ø. Karlsen, B. Norberg, E. Andersson et T. Hansen (2010). Control of puberty in farmed fish, *General and Comparative Endocrinology*, vol. 165, p. 483-515.

Toen, E., Ø. Evensen et I. Skaar (2011). Pathogenicity of *Saprolegnia* spp. to Atlantic salmon, *Salmo salar* L., eggs, *Journal of Fish Diseases*, vol. 34, p. 601-608.

Wargelius, A., P.G. Fjelldal, U. Nordgarden et T. Hansen (2009). Continuous light affects mineralization and delays osteoid incorporation in vertebral bone of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.), *Journal of Experimental Biology*, vol. 212, p. 656-661.

Conditions d'éclairage

Stade biologique	Intensité	Durée (photopériode)	Références
<i>Œuf/Embryon</i>	Basse	<ul style="list-style-type: none"> Lumière constante dans la salle de l'écloserie, mais les œufs doivent être placés dans des plateaux Heath ou CompHatch et peu exposés à la lumière 	Bell et Hoar, 1950 Eisler, 1957
<i>Alevin éclos</i>	Basse	<ul style="list-style-type: none"> Lumière constante dans la salle de l'écloserie, mais les alevins doivent être placés dans des plateaux Heath ou sous du substrat artificiel et peu exposés à la lumière 	Peterson et Martin-Robichaud, 1995
<i>Alevin commençant à se nourrir</i>		<ul style="list-style-type: none"> Lumière constante dans des bassins circulaires peu profonds, en vue d'empêcher la suffocation des alevins dans le tamis du drain du bassin 	
<i>Tacon</i>		<ul style="list-style-type: none"> Lumière constante ou longue photopériode pendant 3 mois sans changement au maximum 	Saunders et Henderson, 1988 Stefansson et coll., 1989
<i>Smolt</i>	>20-40 lux à la surface de l'eau	<ul style="list-style-type: none"> Lumière constante ou longue photopériode (semblable à l'automne) changeant en photopériode courte (semblable à l'hiver, par exemple LO 12:12), suivie d'un retour à la lumière constante ou à une longue photopériode (semblable au printemps) 	Saunders et coll., 1985 McCormick et coll., 1987 Duston et Saunders, 1995 Handeland et coll., 2013
<i>Adulte production</i>		<ul style="list-style-type: none"> Lumière constante pendant les 4-6 premiers mois du premier hiver en mer pour empêcher la maturation Éclairage immergé attirant les poissons loin de la surface de l'eau de façon à prévenir l'exposition aux stades copépodites infectieux du pou du poisson 	Hansen et coll., 1992 Berg et coll., 1996 Taranger et coll., 2010 Liu et Duston, 2019
<i>Géniteur</i>		<ul style="list-style-type: none"> Régime de photopériode de 12 mois induisant la reproduction sans risque pour la survie des œufs Si possible (c'est-à-dire dans une installation terrestre ne laissant pas passer la lumière), placer différentes populations de poissons à différentes phases du régime de photopériodes afin de maximiser la production de gamètes tout au long de l'année 	Taranger et coll., 1998 Bromage et coll., 2001

Tableau 7.1 Résumé des conditions d'intensité et de durée de la lumière blanche convenant au saumon de l'Atlantique (Salmo salar) à chaque stade de production.

L'abréviation LO désigne une alternance de lumière et d'obscurité (rapport lumière-obscurité, en heures).

8 Poissons non reproducteurs, reproduction induite et modification génétique

Conclusions :

- 1. Souvent, le stock de géniteurs mâles présente des blessures et des surinfections connexes réductibles par l'ajout de faibles concentrations d'eau de mer à l'eau douce (1 % d'eau de mer environ et au maximum 10 % d'eau de mer).**
- 2. Quand les poissons triploïdes arrivent à maturité par la smoltification, les taux de déformation augmenteraient, et certains éléments montrent qu'ils sont moins tolérants à la mauvaise qualité de l'eau. Aux stades précédents du cycle biologique, il semblerait que leur rendement soit identique à celui des diploïdes.**
- 3. Une production de triploïdes inefficace causerait des taux élevés de mortalité larvaire et de déformations.**
- 4. Des données montrent que les besoins alimentaires des triploïdes sont différents et que certains effets nocifs rapportés pourraient être atténués par l'alimentation.**
- 5. La production comprenant l'utilisation d'hormones et d'élevages monosexes ne pose probablement pas de problèmes de bien-être graves.**

8.1 Introduction

La production de salmonidés triploïdes stériles peut résoudre le problème du croisement possible entre poissons d'élevage fugitifs et populations de poissons sauvages. Le moment de la reproduction est souvent régulé par des hormones induisant l'ovulation. Ces procédés et les éventuels problèmes de bien-être qu'ils posent sont traités dans la présente section.

8.2 Stock de géniteurs

Certaines exploitations conservent les stocks de géniteurs dans des installations terrestres d'eau douce pour des raisons de sûreté biologique et les fratries marquées au moyen d'étiquettes à transpondeur passif intégré sont dans des cages marines servant à identifier les familles au meilleur rendement, tandis que d'autres sélectionnent les géniteurs simplement dans la population générale. Les mâles et les femelles sont retenus dans un même bassin aux fins de communication phéromonale. Souvent, les pisciculteurs manipulent les photopériodes et les températures pour avancer ou retarder le moment de la fraie et obtenir plusieurs fraies par an (les questions de bien-être liées aux photopériodes sont traitées dans la *section 7 : Éclairage*).

Tous les géniteurs potentiels sont étiquetés et un échantillon de leur génotype est prélevé. Selon les résultats du génotypage, les géniteurs sont séparés en deux groupes : ceux qui seront utilisés et ceux mis à la réforme. Le tissu servant au génotypage est parfois une écaille, mais le plus souvent on réalise une ablation dans la nageoire caudale ou la nageoire adipeuse. La nageoire adipeuse se développe différemment selon les groupes de poissons, et des éléments montrent qu'elle a une fonction mécanosensorielle chez les salmonidés. D'élégantes études anatomiques montrent que l'innervation et la disposition de la trame et des fibres de collagène sont typiques des mécanorécepteurs (Buckland-Nicks, 2016). La suppression de la nageoire adipeuse entraîne

une augmentation de 8 % de l'amplitude de la nageoire caudale pendant la nage par rapport à un poisson sans ablation, mais ne modifie pas la fréquence de battement de la queue, ce qui laisse supposer qu'elle agit comme un capteur de turbulences précaudal (Reimchen et Temple, 2004). Des études électrophysiologiques montrent qu'elle agit comme un mécanorécepteur chez le poisson-chat, avec une réponse aux petites déformations mécaniques. D'après ce qui précède et des observations selon lesquelles la blessure d'une ablation de nageoire cicatrise rapidement (se referme en 6 à 12 heures, même à basse température, retour de l'épiderme à la normale et absence d'inflammation), Andrews et coll. (2015) avancent que l'ablation de la nageoire adipeuse des salmonidés ne nuit pas à leur bien-être. Toutefois, Roques et coll. (2010) affirment que l'ablation de la nageoire caudale du tilapia et de la carpe – qui n'ont pas de nageoire adipeuse – pose un problème de bien-être, en raison de l'augmentation de l'activité natatoire et des mouvements aléatoires chez les poissons ayant subi l'ablation (mais les auteurs ne présentent pas de données probantes et ont réalisé l'ablation de nageoire sans anesthésie). De plus, ils ont constaté la modification de la localisation des cellules muqueuses des branchies et de la sécrétion de mucus, ce qui indique, selon eux, une libération de mucus induite par le stress (bien que les autres marqueurs de stress – glucose, lactate, cortisol dans le sang, ou osmolalité – soient restés inchangés). D'autres données montrent que les nageoires caudales des Cyprinidés contiennent des nocicepteurs, car la carpe répond à un choc électrique à la queue atténué par des opioïdes (Chervova et Lapshin, 2011). Par conséquent, le Comité scientifique conclut que, bien que l'ablation de la nageoire puisse représenter un stimulus nocif induisant une réponse nocifensive (probablement selon l'espèce), les problèmes de bien-être connexes seraient de courte durée seulement et minimaux, particulièrement en cas d'ablation de la nageoire adipeuse de salmonidés.

Pendant la période précédant la fraie, l'état de préparation des poissons est vérifié hebdomadairement, en général, au moyen d'ultrasons, moyen efficace et peu invasif de vérifier la capacité reproductive (par exemple Naeve et coll., 2019), dans lequel le stress est suscité uniquement par la manipulation nécessaire. Le sexe des poissons est déterminé par ultrason et les mâles en nombre excessif sont mis à la réforme. Le moment de l'ovulation doit être connu, car juste après l'ovulation, les œufs commencent à perdre de leur viabilité. Si les œufs ne sont pas extraits en temps opportun, le succès de la fécondation est nettement moindre. La laitance peut être collectée quelques heures avant l'heure d'ovulation prévue. De plus, l'utilisation de produits prolongeant la durée de vie de la laitance est courante (Nynca et coll., 2016) et certains producteurs utilisent maintenant de la laitance cryopréservée.

Avant et pendant la fraie, les mâles matures ont un comportement agonistique dans la nature et probablement dans les bassins, car les géniteurs mâles d'élevage sont souvent blessés (Johnsson et coll., 2001; Weir et coll., 2005). Les blessures et la diminution de l'immunité associée à la maturité sexuelle causent l'augmentation des infections fongiques (*Saprolegnia sp.*) et des surinfections générales qui mettent en danger le bien-être du stock de géniteurs. Toutefois, la plupart des infections opportunistes sont liées à de mauvaises pratiques d'élevage ou à l'état de l'hôte (par exemple Wedemeyer et coll., 1999; Beldomenico et Begon, 2010.). L'eau douce est essentielle à la maturation sexuelle, mais l'ajout d'eau de mer en faibles concentrations (environ 1 % d'eau de mer et pas plus de 10 %) peut diminuer les infections fongiques sans nuire à la maturation sexuelle (par exemple Long et coll., 1977).

Pour toutes les fraies en pisciculture, les poissons sont d'abord tranquilisés ou anesthésiés au moyen de méthanesulfonate de tricaine (TMS ou MS-222), une pratique largement considérée comme acceptable (pour en savoir plus sur l'anesthésie, voir AVMA, 2020). Les œufs et la laitance sont extraits manuellement, chirurgicalement ou, dans certains cas, par un processus dit d'injection d'air. Sur les espèces itéropares (soit les espèces ayant plusieurs cycles de reproduction : omble chevalier, truite, saumon de l'Atlantique), les gamètes sont parfois prélevés manuellement. L'extraction manuelle implique une manipulation susceptible d'être un facteur de stress. De plus, si l'opération est réalisée incorrectement ou que le poisson n'est pas complètement anesthésié, son bien-être peut être compromis par une blessure (chute ou pression trop forte par exemple) ou une infection causée par la mauvaise manipulation ou l'altération de la couche de mucus. Chez les espèces sémelpares, il est essentiel de préserver la qualité de l'eau dans les bains de rétablissement. Pour ces espèces (soit les espèces ayant un cycle de reproduction unique avant la mort, par exemple le saumon du Pacifique), certaines exploitations utilisent du méthanesulfonate de tricaine (TMS) et la percussion avant l'extraction chirurgicale ou manuelle et d'autres ajoutent une saignée au protocole. L'inconvénient de la percussion et de la saignée est le risque de contamination des gamètes pendant le processus; il est vrai qu'ils peuvent aussi être contaminés par de l'urine ou des fèces introduites par l'extraction manuelle. Une petite pisciculture utilise l'électro-immobilisation sur le saumon quinnat; cette technique ne modifie ni la mortalité embryonnaire ni la croissance des alevins de cette espèce (Hudson et coll., 2015). Généralement, les œufs fécondés sont désinfectés au moyen d'une solution iodophile isotonique, rincés, puis durcis dans l'eau douce avant d'être transférés dans un incubateur. La désinfection des embryons à l'iode est efficace et ne semble pas toxique pour les embryons de saumon de l'Atlantique à de faibles concentrations (50-75 mg/l; Chalupnicki et coll., 2011).

Par conséquent, les problèmes de bien-être liés à la reproduction et au stock de géniteurs en salmoniculture sont la manipulation des photopériodes (examinée à la *section 7 : Éclairage*) ainsi que le stress de la manipulation et de l'anesthésie nécessaires aux vérifications fréquentes du sexe et de la capacité reproductive (les indicateurs de stress sont examinés à la *section 2 : Indicateurs de stress*).

8.3 Triploïdie et préoccupations relatives au bien-être

En aquaculture, la triploïdie est une proposition visant à produire des populations d'élevage stériles (considérées comme souhaitables car elles réduisent les conséquences possibles de la présence de poissons fugitifs dans les populations sauvages; Benfey, 2016). En général, on produit les triploïdes en faisant subir un choc (chaud/froid ou pression) aux œufs peu après la fécondation, ce qui interfère avec l'achèvement de la méiose. Toutes les cellules de tous les triploïdes sont plus grandes que celles de leurs parents diploïdes, car elles contiennent un jeu de chromosomes supplémentaire. Les femelles ne développent pas de caractères sexuels secondaires et leurs ovaires sont extrêmement réduites, tandis que les mâles développent des caractères sexuels secondaires normaux et ont de grands testicules.

Étant donné que le traitement de choc est appliqué aux œufs et non aux poissons éclos, la procédure ne semble pas introduire de problème de bien-être immédiat (Benfey, 2011), bien que les méthodes inefficaces de production de triploïdes puissent être liées à des taux élevés de mortalité larvaire et de déformations chez certaines espèces (par exemple Peruzzi et Chatain,

2000). De plus, en général, les triploïdes ne survivent pas aussi bien que les diploïdes dans des conditions de stress chronique, comme des températures élevées conjuguées à de l'hypoxie, ou des changements de salinité (par exemple Myers et Hershberger, 1991; Blanc et coll., 1992; Ojolick et coll., 1995), bien que leur réponse à des facteurs de stress plus aigus semble similaire à celle de leurs homologues diploïdes (Fraser et coll., 2012a; Benfey et Devlin, 2018). Des données montrent que l'intolérance aux températures élevées serait le résultat d'une moindre capacité à maintenir la protéostase dans des conditions stressantes; parce que les poissons triploïdes ont des niveaux basiques de protéines de choc thermique (PCT) inférieures, ils ne sont pas en mesure de montrer une réponse au choc thermique en cas de températures très élevées (Saranyan et coll., 2017). À l'heure actuelle, des résultats de tests de provocation d'agents pathogènes *in vivo* montrent que la ploïdie n'altère ni la sensibilité aux maladies (par exemple Moore et coll., 2017; Fraser et coll., 2012a) ni la réussite de la vaccination (par exemple Yamamoto et Iida, 1995; Johnson et coll., 2004), mais les triploïdes ont un plus grand nombre de cellules immunitaires irrégulières ou déformées (par exemple Wlasow et Fopp-Bayat, 2011) et un nombre inférieur de lymphocytes B (par exemple Fraser et coll., 2012b) chez certaines espèces par rapport aux diploïdes. Certaines études constatent une sensibilité aux maladies différente selon la ploïdie (par exemple Myers et Hershberger, 1991; Ojolick et coll., 1995; Cotter et coll., 2002; Ching et coll., 2010), mais ces différences se confondent généralement avec le stress thermique simultané, ce qui indiquerait que la fonction immunitaire des triploïdes est compromise en cas de stress supplémentaire dû à la température (Fraser et coll., 2012a). Il est possible que les triploïdes aient une résistance toxicologique supérieure à celle des diploïdes, moins de tumeurs après une exposition aux cancérigènes (Thorgaard et coll., 1999) et une progression plus lente du développement de lésions après une exposition à l'aflatoxine B1 (un cancérigène; Arana et coll., 2002). Les données concernant les effets de la triploïdie sur la croissance et l'efficacité de conversion des aliments ne sont pas concluantes (Fraser et coll., 2012a; Benfey, 2016). Quand ils sont élevés avec des diploïdes, les triploïdes peuvent présenter des taux de croissance réduits (par exemple Thorgaard et coll., 1982; Galbreath et coll., 1994) et une plus grande érosion des nageoires (par exemple Carter et coll., 1994), qui pourraient s'expliquer par le comportement généralement moins agressif souvent observé chez les triploïdes (Fraser et coll., 2012a).

Bien que les taux de déformations des triploïdes aux premiers stades du cycle biologique en eau douce soient généralement bas (<2 % de la population; Benfey, 2016), plusieurs études montrent que les truites arc-en-ciel et les saumons de l'Atlantique adultes triploïdes ont une plus grande incidence de déformation de la mâchoire et d'autres anomalies squelettiques (par exemple Sadler et coll., 2001; Leclercq et coll., 2011; Fraser et coll., 2012a), de cataractes (par exemple Leclercq et coll., 2011) et de développement anormal des lamelles branchiales (Sadler et coll., 2001) pendant et après la smoltification. En général, les triploïdes ont une plus grande probabilité de rejet ou de déclassement à la récolte en raison de déformations (par exemple Fraser et coll., 2013; Benfey, 2016); c'est pourquoi ils n'ont pas été adoptés dans les élevages canadiens de saumon de l'Atlantique (Benfey, 2016). Des données récentes montrent que les déformations sont réductibles au moyen de régimes alimentaires différents, car les besoins nutritionnels entre ploïdies diffèrent (Vera et coll., 2019). D'autres essais sont en cours en Norvège et dans l'Union européenne (UE). Récemment, Smedley et coll. (2018) ont affirmé qu'une supplémentation en phosphore est cruciale au développement du squelette des triploïdes jusqu'à la smoltification, mais les quantités exactes de phosphore requises n'ont pas encore été déterminées. Il a été avancé qu'il faut tenir compte des différences entre diploïdes et triploïdes à la récolte dans les

essais de sélection pour réduire ou éliminer les différences de déclassement et de rejet à la récolte (Benfey, 2016). À l'heure actuelle, tous les élevages de truite arc-en-ciel du Nouveau-Brunswick doivent utiliser soit des triploïdes soit des populations composées de femelles uniquement, selon le lieu (province du Nouveau-Brunswick, 2016).

8.4 Population monosexue

Comme dans les élevages bovins, porcins et ovins, la maturation sexuelle diminue la qualité et la quantité des produits et des mesures d'atténuation des changements qu'elle induit sont prises. Chez les salmonidés, les mâles arrivent généralement à maturité plus tôt (particulièrement en raison de la tendance à la précocité des mâles) et la maturation entraîne souvent l'augmentation des agressions. Quant aux femelles, leur croissance est généralement plus rapide et plus importante, mais elles arrivent à maturité plus tard (ou parfois n'y arrivent pas avant la récolte). Par conséquent, les élevages comportant uniquement des femelles peuvent être profitables tout en réduisant le taux d'agressions entre poissons adultes.

On peut produire des poissons gynogénètes (possédant une hérédité uniquement maternelle) diploïdes en bloquant la première extrusion du second globule polaire ou en bloquant la première segmentation pendant la maturation de l'ovocyte. Il reste des incertitudes sur la réglementation relative à l'utilisation d'hormones dans la manipulation aux fins de détermination du sexe, mais la production de salmonidés peut être améliorée si seules des femelles sont élevées. Pour cela, il faut manipuler le phénotype sexuel en exposant les poissons juvéniles du stock de géniteurs potentiel à du 17-alpha-méthyltestosterone par immersion ou incorporation dans l'alimentation. Toutes les truites arc-en-ciel d'élevage du Nouveau-Brunswick doivent être soit triploïdes soit se trouver dans des populations de femelles uniquement, selon le lieu (province du Nouveau-Brunswick, 2016). Certaines salmonicultures terrestres de Nouvelle-Écosse importent d'Islande des œufs uniquement de femelles pour réduire le problème de la maturation précoce des mâles. Le Comité scientifique conclut que la production ou l'utilisation de salmonidés monosexes ne posent probablement pas de problèmes graves de bien-être.

8.5 Utilisation d'hormones

Étant donné que tous les salmonidés sauvages creusent des nids dans le gravier (frayères à salmonidés) et que les exploitations aquacoles n'ont pas de substrat, elles réalisent pour tous les salmonidés une ponte artificielle par extraction et fraie, aux fins de collecte des gamètes et de fécondation. La maîtrise du temps est essentielle à l'efficacité de ces procédés. Or, les hormones peuvent y aider, particulièrement en induisant l'ovulation. Bien que plusieurs analogues différents de la gonadolibérine (GnRH) soient disponibles, les seuls produits homologués pour un usage en aquaculture commerciale sont Ovaplant (implant de comprimé de temporisation; Syndel) et Ovaprim (injectable; Syndel), utilisés en Amérique du Nord, et Gonazon^{MD} (Intervet), utilisé en Europe; ils sont efficaces sur les salmonidés (Haffray et coll., 2005; Svinger et Policar, 2013). Chorulon (gonadotrophine chorionique; Merck) est approuvé aux États-Unis. En général, la GnRH_a est administrée sous la forme de deux injections (10-100 µg/kg) espacées de 3 jours ou d'une seule application d'un dispositif d'administration de la GnRH_a (10-50 µg/kg) environ deux semaines avant le début de la maturation naturelle des géniteurs. Les deux méthodes provoquent l'ovulation dans 100 % du stock dans les deux semaines suivant le traitement. On n'utilise pas ce type de traitement chaque fois, mais quand les femelles et les mâles ne sont pas synchronisés

(par exemple si les mâles et les femelles proviennent de différentes exploitations, etc.), ils peuvent se montrer particulièrement utiles. Le Comité scientifique a eu des difficultés à trouver des études évaluées par des pairs concernant les effets sur le bien-être causés par l'action des hormones en elles-mêmes (mais les doses utilisées se rapprochent des niveaux physiologiques) ou au sujet du site d'injection du comprimé, mais il est probable qu'un stress soit associé à l'application des hormones en raison de la manipulation et de l'anesthésie requises avant l'injection (les indicateurs de stress sont examinés dans la *section 2 : Indicateurs de stress*) et de la possibilité d'une infection au site d'injection après cette dernière.

8.6 Modification génétique

Les techniques de modification génétique commencent à jouer un rôle plus important dans la production de salmonidés. La domestication est le résultat de l'élevage sélectif de certains phénotypes (croissance rapide, tolérance aux maladies par exemple). Elle est susceptible de nuire au bien-être par des conséquences négatives non voulues du caractère sélectionné (par exemple croissance somatique accrue et problèmes squelettiques, comme chez les dindes; Hocking, 2014) ou par la sélection simultanée non voulue d'autres caractères comme l'augmentation de la réponse au stress ou de l'agression (par exemple Nicieza et Metcalfe, 1999). Plus récemment, l'introduction de nouveaux gènes dans le génome de salmonidés au moyen de nouvelles technologies (le saumon AquAdvantage par exemple; Smith et coll., 2010) et le développement de lignées génétiques pourraient poser des problèmes de bien-être (question examinée chez les animaux en général par Ormandy et coll., 2011, et chez les salmonidés par Hallerman et coll., 2007). Il est possible que les nouveaux gènes de modulation de la croissance dissocient la croissance proportionnelle des tissus, créant une incompatibilité entre les taux de croissance des tissus musculaires par rapport aux os ou au tissu conjonctif, bien que cela n'ait pas encore été démontré chez les salmonidés. Puisque la modification génétique des salmonidés se poursuit et que l'édition génomique fait son apparition (Gratacap et coll., 2019), il faut s'assurer d'envisager toutes les conséquences possibles sur le bien-être en s'appuyant sur les données concernant d'autres espèces génétiquement modifiées (les souris par exemple; Wells et coll., 2006) ainsi que sur une compréhension minutieuse du bien-être des salmonidés.

8.7 Références

American Veterinary Medical Association (AVMA) (2020). *Guidelines for the Euthanasia of Animals: 2020 Edition*.

Andrews, M., M. Stormoen, H. Schmidt-Posthaus, T. Wahli et P.J. Midtlyng (2015). Rapid temperature-dependent wound closure following adipose fin clipping of Atlantic salmon *Salmo salar* L., *Journal of Fish Diseases*, vol. 38, p. 523-531.

Arana, S., Y.A. Tabata, M. Sabino, M.G. Rigolino et F.J. Hernandez Blazquez (2002). Differential effect of chronic aflatoxin B1 intoxication on the growth performance and incidence of hepatic lesions in triploid and diploid rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), *Archivos de Medicina Veterinaria*, vol. 34, p. 253-263.

Beldomenico, P.M. et M. Begon (2010). Disease spread, susceptibility and infection intensity: vicious circles?, *Trends in Ecology & Evolution*, vol. 25(2), p. 21-27.

- Benfey, T.J. (2011). Physiology of triploid fish. In: Farrell A. (ed). *Encyclopedia of Fish Physiology*, vol. 3., Elsevier, p. 2009-2015.
- Benfey, T.J. (2016). Effectiveness of triploidy as a management tool for reproductive containment of farmed fish: Atlantic salmon (*Salmo salar*) as a case study, *Reviews in Aquaculture*, vol. 8, p. 264-282.
- Benfey, T.J. et R.H. Devlin (2018). Ploidy have minimal effect on hypoxia tolerance at high temperature in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), *Physiological and Biochemical Zoology*, vol. 91(6), p. 1091-1101.
- Blanc, J.M., H. Poisson et F. Vallee (1992). Survival, growth and sexual maturation of the triploid hybrid between rainbow trout and Arctic char, *Aquatic Living Resources*, vol. 5, p. 15-21.
- Buckland-Nicks, J.A. (2016). New details of the neural architecture of the salmonid adipose fin, *Journal of Fish Biology*, vol. 89(4), p. 1991-2003.
- Carter, C.G., I.D. McCarthy, D.F. Houlihan, R. Johnstone, M.V. Walsingham et A.I. Mitchell (1994). Food-consumption, feeding behavior, and growth of triploid and diploid Atlantic salmon, *Salmo salar* L. parr, *Canadian Journal of Zoology*, vol. 72, p. 609-617.
- Chalupnicki, M.A., H.G. Ketola, C.E. Starliper et D. Gallagher (2011). Efficacy and toxicity of iodine disinfection of Atlantic salmon eggs, *North American Journal of Aquaculture*, vol. 73, p. 124-128.
- Chervova, L.S. et D.N. Lapshin (2011). Behavioral control of the efficiency of pharmacological anesthesia in fish, *Journal of Ichthyology*, vol. 51, p. 1126-1132.
- Ching, B., S. Jamieson, J.W. Heath, D.D. Heath et A. Hubberstey (2010). Transcriptional differences between triploid and diploid chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) during live *Vibrio anguillarum* challenge, *Heredity*, vol. 104, p. 224-234.
- Cotter, D., V. O'Donovan, A. Drumm, N. Roche, E.N. Ling et N.P. Wilkins (2002). Comparison of freshwater and marine performances of all-female diploid and triploid Atlantic salmon (*Salmo salar* L.), *Aquaculture Research*, vol. 33, p. 43-53.
- Fraser, T.W.K., P.G. Fjelldal, T. Hansen et I. Mayer (2012a). Welfare considerations of triploid fish, *Reviews in Fisheries Science*, vol. 20(4), p. 192-211.
- Fraser, T.W.K., T. Hansen, J.E. Skjæraasen, I. Mayer, F. Sambraus et P.G. Fjelldal (2013). The effect of triploidy on the culture performance, deformity prevalence, and heart morphology in Atlantic salmon, *Aquaculture*, vol. 416-417, p. 255-264.
- Fraser, T.W.K., A. Rønneseth, G.T. Haugland, P.G. Fjelldal, I. Mayer et H.I. Wergeland (2012b). The effect of triploidy and vaccination on neutrophils and B-cells in the peripheral blood and head kidney of 0+ and 1+ Atlantic salmon (*Salmo salar*) post-smolts, *Fish and Shellfish Immunology*, vol. 33, p. 60-66.
- Galbreath, P.F., W.S. Jean, V. Anderson et G.H. Thorgaard (1994). Freshwater performance of all-female diploid and triploid Atlantic salmon, *Aquaculture*, vol. 128, p. 41-49.

- Gratacap, R.L., A. Wargelius, R.B. Edvardsen et R.D. Houston (2019). Potential of genome editing to improve aquaculture breeding and production, *Trends in Genetics*, vol. 35(9), p. 672-684.
- Haffray, P., W.J. Enright, M.A. Driancourt, T. Mikolajczyk, P. Rault et B. Breton (2005). Optimization of breeding of salmonids: Gonazon™, the first officially approved inducer of ovulation in the EU, *Aquaculture Magazine*, vol. 52, 6 p..
- Hallerman, E.M., E. McLean et I.A. Fleming (2007). Effects of growth hormone transgenes on the behavior and welfare of aquacultured fishes: a review identifying research needs, *Applied Animal Behavior Science*, vol. 104, p. 265-294.
- Hocking, P.M. (2014). Unexpected consequences of genetic selection in broilers and turkeys: Problems and solutions, *British Poultry Science*, vol. 55(1), p. 1-12.
- Hudson, J.M., M. Kavanagh, S. Castle et B. Silver (2015). Lack of effect on embryo mortality and fry growth from adult Coho Salmon subjected to electronarcosis prior to spawning, *North American Journal of Aquaculture*, vol. 76, p. 346-350.
- Johnson, R.M., J.M. Shrimpton, J.W. Heath et D.D. Heath (2004). Family, induction methodology and interaction effects on the performance of diploid and triploid chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*), *Aquaculture*, vol. 234, p. 123-142.
- Johnsson, J.I., E. Sernland et M. Blixt (2001). Sex-specific aggression and antipredator behaviour in young brown trout, *Ethology*, vol. 107(7), p. 587-599.
- Leclercq, E., J.F. Taylor, D. Fison, P.G. Fjelldal, M. Diez-Padrisa, T. Hansen et H. Migaud (2011). Comparative seawater performance and deformity prevalence in out-of-season diploid and triploid Atlantic salmon (*Salmo salar*) post-smolts, *Comparative Biochemistry and Physiology*, vol. 158A, p. 116-125.
- Long, C.W., J.R. McComas et B.H. Monk (1977). Use of salt (NaCl) water to reduce mortality of Chinook salmon smolts, *Oncorhynchus tshawytscha*, during handling and hauling, *Marine Fisheries Review*, vol. 39(7), p. 6-9.
- Moore, L.J., T.O. Nilsen, J. Jarungsriapisit, P.G. Fjelldal, S.O. Stefansson, G.L. Taranger et S. Patel (2017). Triploid Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) post-smolts accumulate prevalence more slowly than diploid salmon following bath challenge with salmonid alphavirus subtype 3, *PLoS One*, vol. 12(4), n° e0175468.
- Myers, J.M. et W.K. Hershberger (1991). Early growth and survival of heat-shocked and tetraploid-derived triploid rainbow-trout (*Oncorhynchus mykiss*), *Aquaculture*, vol. 96, p. 97-107.
- Naeve, I., M. Mommens, A. Arukwe, J. Virtanen, Md. Enamul Hoque et E. Kjørsvik (2019). Ultrasound as a noninvasive tool for monitoring reproductive physiology in male Atlantic salmon (*Salmo salar*), *Physiological Reports*, vol. 7(13), n° e14167.
- Nicieza, A.G. et N.B. Metcalfe (1999). Costs of rapid growth: The risk of aggression is higher for fast-growing salmon, *Functional Ecology*, vol. 13, p. 793-800.

- Nynca, J., S. Judycka, E. Liszewska, S. Dobosz, J. Grudniewska, K. Arai, T. Fujimoto et A. Ciereszko (2016). Utility of different sugar extenders for cryopreservation and post-thaw storage of sperm from Salmonidae species, *Aquaculture*, vol. 464, p. 340-348.
- Ojolick, E.J., R. Cusack, T.J. Benfey et S.R. Kerr (1995). Survival and growth of all-female diploid and triploid rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) reared at chronic high temperature, *Aquaculture*, vol. 131, p. 177-187.
- Ormandy, E.H., J. Dale et G. Griffin (2011). Genetic engineering of animals: ethical issues, including welfare concerns, *The Canadian Veterinary Journal*, vol. 52(5), p. 544-550.
- Peruzzi, S. et B. Chatain (2000). Pressure and cold shock induction of meiotic gynogenesis and triploidy in the European sea bass, *Dicentrarchus labrax* L.: Relative efficiency of methods and parental variability, *Aquaculture*, vol. 189, p. 23-37.
- Province du Nouveau-Brunswick (2016). *Politique sur l'élevage de la truite arc-en-ciel au Nouveau-Brunswick*, Ministère des Ressources naturelles et du Développement de l'énergie du Nouveau-Brunswick.
- Reimchen, T.E. et N.F. Temple (2004). Hydrodynamic and phylogenetic aspects of the adipose fin in fishes, *Canadian Journal of Zoology*, vol. 82, p. 910-916.
- Roques, J.A.C., W. Abbink, F. Geurds, H. van de Vis et G. Flik (2010). Tailfin clipping, a painful procedure: Studies on Nile tilapia and common carp, *Physiology and Behavior*, vol. 101(4), p. 533-540.
- Sadler, J., M. Pankhurst et H.R. King (2001). High prevalence of skeletal deformity and reduced gill surface area in triploid Atlantic salmon (*Salmo salar* L.), *Aquaculture*, vol. 198, p. 369-386.
- Saranyan, P.V., N.W. Ross et T.J. Benfey (2017). Erythrocyte heat shock protein response to chronic (*in vivo*) and acute (*in vitro*) temperature challenges in diploid and triploid salmonids, *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular and Integrative Physiology*, vol. 206, p. 95-104.
- Smedley, M.A., H. Migaud, E.L. McStay, M. Clarkson, P. Bozzolla, P. Campbell et J.F. Taylor (2018). Impact of dietary phosphorus in diploid and triploid Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) with reference to early skeletal development in freshwater, *Aquaculture*, vol. 490, p. 329-343.
- Smith, M.D., F. Asche, A.G. Guttormsen et J.B. Wiener (2010). Genetically modified salmon and full impact assessment, *Science*, vol. 330(6007), p. 1052-1053.
- Svinger, V.W. et T. Policar (2013). Effects of salmon gonadotropin-releasing hormone analog (GnRHa) on reproductive success and egg size in rainbow trout and brook trout, *North American Journal of Aquaculture*, vol. 75, p. 474-486.
- Thorgaard, G.H., D.N. Arbogast, J.D. Hendricks, C.B. Pereira et G.S. Bailey (1999). Tumor suppression in triploid trout, *Aquatic Toxicology*, vol. 46, p. 121-126.
- Thorgaard, G.H., P.S. Rabinovitch, M.W. Shen, G.A.E. Gall, J. Propp et F.M. Utter (1982). Triploid rainbow trout identified by flow cytometry, *Aquaculture*, vol. 29, p. 305-309.

Vera, L.M., E.J. Lock, K. Hamre, H. Migaud, D. Leeming, D.R. Tocher et J.F. Taylor (2019). Enhanced micronutrient supplementation in low marine diets reduced vertebral malformation in diploid and triploid Atlantic salmon (*Salmo salar*) parr and increased vertebral expression of bone biomarker genes in diploids, *Comparative Biochemistry and Physiology B*, vol. 237, n° 110327.

Wedemeyer, G.A., F.P. Meyer et L. Smith (1999). Environmental Stress and Fish Diseases, Narendra Publishing House, New Delhi, India, 192 p.

Weir, L.K., J.A. Hutchings, I.A. Fleming et S. Einum (2005). Spawning behaviour and success of mature male Atlantic salmon (*Salmo salar*) parr of farmed and wild origin, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 62(5), p. 1153-1160.

Wells, D.J., L.C. Playle et W.E.J. Enser (2006). Assessing the welfare of genetically altered mice, *Laboratory Animals*, vol. 40(2), p. 111-114.

Wlasow, T. et D. Fopp-Bayat (2011). The effect of thermal shock on morphological characteristics of blood cells in Siberian sturgeon (*Acipenser baerii*) triploids, *Acta Veterinaria Brno*, vol. 80, p. 215-218.

Yamamoto, A. et T. Iida (1995). Susceptibility of triploid rainbow trout to IHN, furunculosis and vibriosis, *Fish Pathology*, vol. 30, p. 69-70.

9 Abattage dans un coulis de glace

Conclusions :

1. **La réfrigération rapide des salmonidés n'est pas létale si le coulis de glace a une température supérieure à $-0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, point de congélation du sang. Un coulis de glace sursalée peut être de température inférieure à $-0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ et donc être léthal. L'effet dépend de façon marquée de la température d'acclimatation avant la réfrigération.**
2. **Il n'est pas prouvé que les poissons possèdent des nocicepteurs sensibles au froid, mais les études disponibles se limitent à la truite et au poisson-zèbre.**
3. **L'omble chevalier n'a ni réponse comportementale ni pertes de réflexes en cas de refroidissement rapide.**
4. **Les réponses physiologiques ou comportementales à la réfrigération rapide ne sont probablement pas dues à la stimulation de nocicepteurs. Elles sont sans doute plutôt causées par la stimulation des récepteurs thermiques agissant dans les réponses de thermorégulation comportementale.**
5. **Une à deux minutes de réfrigération rapide suffisent pour que le cerveau refroidisse au point de compromettre la fonction neuronale et musculaire.**
6. **À l'heure actuelle, on ne connaît pas la cause de la mort pendant l'abattage dans un coulis de glace, mais il s'agit probablement de l'asphyxie. Il se peut que le poisson s'asphyxie en raison d'une paralysie. En effet, les températures froides bloquent la conduction nerveuse chez d'autres espèces de poissons et la réfrigération pourrait faire cesser la fonction motrice, ce qui causerait l'asphyxie par absence d'irrigation des branchies. Une autre possibilité serait que le poisson s'asphyxie par hypoxie : sans oxygénation supplémentaire, les teneurs en oxygène des bassins de réfrigération diminuent probablement peu à peu.**
7. **Le nombre insuffisant d'études s'appuyant sur des méthodes expérimentales validées pour mettre à l'épreuve les éventuels problèmes de bien-être causés par l'abattage dans un coulis de glace nous empêchent de tirer des conclusions sur le processus et la cause de la mort. Il faudrait mener d'autres recherches pour déterminer si les poissons sont insensibles (c'est-à-dire incapables de percevoir et d'intégrer les informations sensorielles) avant la mort par asphyxie.**
8. **L'abattage dans un coulis de glace avec ajout de CO_2 est généralement considéré comme une méthode normalisée d'abattage inadéquate, car il entraîne des comportements considérables de fuite et de tentatives de se débattre ainsi qu'une réponse à un stress aigu.**

9.1 Introduction

Dans une récente revue de la littérature, Browning et Veit (2020) affirment que « jamais aucun abattage ne pourra être complètement sans cruauté ». Il s'agit d'une question éthique qu'on ne peut résoudre aisément ou simplement à partir des seules preuves scientifiques. Pour les besoins du présent rapport, notre définition de l'abattage est « le fait de tuer des animaux à des fins

alimentaires ». L'abattage sans cruauté désigne par conséquent un abattage qui témoigne de considération pour l'expérience affective que pourraient avoir les animaux (voir la discussion de ce sujet chez les poissons dans la *section 1 : Sensibilité des poissons*) en infligeant un malaise minimal avant la mort. C'est pourquoi nous pouvons, à partir des données scientifiques, nous demander s'il est prouvé que les poissons sont insensibilisés (ce qui signifie qu'ils ne peuvent plus percevoir ni intégrer d'informations sensorielles) aussi rapidement que possible et avec une détresse minimale par une méthode d'abattage donnée.

La réfrigération rapide au moyen de coulis de glace est la principale méthode d'abattage employée dans la production de truites de l'Ontario. En général, pendant l'abattage dans un coulis de glace, les poissons sont transférés des viviers en filet ou en bassin vers un coulis de glace et d'eau non oxygéné où ils sont conservés jusqu'à leur mort. En se fondant sur l'examen de la littérature scientifique traitant du refroidissement rapide des salmonidés, le présent chapitre estime la contribution relative possible de différents facteurs de stress pendant l'abattage dans un coulis de glace, tel qu'il est pratiqué à l'heure actuelle au Canada. Notons qu'il n'existe pas d'articles scientifiques étudiant directement le bien-être du poisson pendant l'ensemble du processus dans les piscicultures.

9.2 Le refroidissement de poissons vivants est-il léthal pour les salmonidés?

Les salmonidés sont des poissons d'eau froide, qui préfèrent les températures variant de 4,5 à 15,5 °C, selon le stade du cycle biologique et l'espèce (Sauter et coll., 2001; McCullough, 2001). Comme la plupart des poïkilothermes, quand la température corporelle centrale baisse à un niveau sous-optimal, la plupart des fonctions métaboliques et physiologiques ralentissent progressivement (Crawshaw, 1979; Guderley et Blier, 1988). La température à laquelle les poissons meurent à la réfrigération dépend de la salinité de l'eau, de la température à laquelle les poissons étaient acclimatés avant le refroidissement et de l'espèce. L'eau douce (ED) gèle à 0,0 °C, l'eau de mer (EM) à -1,9 °C et le plasma sanguin à -0,7 °C. C'est pourquoi il est impossible que la mort soit causée par la congélation du sang dans un coulis de glace d'ED, mais possible dans un coulis de glace d'EM. Le point de congélation (PC) diminue avec l'ajout d'osmolytes (substances dissoutes) de 1,86 °C/osmole. L'osmolalité du plasma et du liquide tissulaire des salmonidés est d'environ 0,4 osmole, ce qui fait baisser le point de congélation à environ 0,7 °C. À des températures inférieures, les fluides corporels sont surrefroidis ou gelés.

Les poissons s'accliment à leur température d'élevage en adaptant leur biochimie et la structure de leur membrane cellulaire. La réponse comportementale au refroidissement et la température létale inférieure diminuent quand le poisson s'adapte à des températures plus basses. Par conséquent, la réponse à une chute abrupte de la température dépend de la température d'acclimation du poisson. Ainsi, la température létale la plus basse est d'environ 4 °C pour des saumons de l'Atlantique acclimatés à 15 °C, alors que chez des salmonidés acclimatés à 10 °C soumis à une baisse abrupte de la température, la mort (quantifiée après une période de traitement de 24 heures) se produit entre 0,5 et 3,0 °C (Brett, 1952; Elliott & Elliot, 2010). Chez des truites arc-en-ciel acclimatées à 10 °C, la tolérance (TLm; température causant 50 % de mortalité en 96 heures) est d'environ 0,5 °C. Aux températures inférieures à la TLm, la mortalité se produit généralement dans les premières 24 heures (Becker et coll., 1977). Le transfert abrupt de saumons juvéniles (cinq espèces du Pacifique, ~5 g) de leur température d'acclimation à des températures d'eau douce pouvant descendre jusqu'à 0,1 °C entraîne ce que les auteurs appellent

une « animation suspendue », dont se sont rétablis certains individus transférés ensuite à une température de 12 °C (Brett, 1952). Dans l'étude de Brett, un des indicateurs fiables de la mort par refroidissement était le changement de position des opercules de fermés à grand ouverts. De même, Hovda et Linley (2000) ont affirmé que le saumon rose est anesthésié dans la saumure froide (à -3 ou -6 °C) en moins d'une minute et qu'il se rétablit en moins d'une minute si on lui fait retrouver une température d'acclimatation (8,5 °C). Chez une autre espèce, le turbot (*Scophthalmus maximus*), un rétablissement est constaté après que des poissons élevés à ~13 °C ont été immergés dans de l'eau de mer à -1,4 °C pendant 90 minutes (Roth et coll., 2009). Cependant, parce que la tolérance thermique diffère d'une espèce à l'autre, il faudrait étudier ces résultats sur les salmonidés. Les données probantes indiquent par conséquent que le refroidissement rapide n'est pas létal en soi pour les salmonidés, mais que leur résilience au refroidissement dépend de plusieurs facteurs. Cette conclusion concorde avec celles de l'Association américaine de médecine vétérinaire (AVMA pour American Veterinary Medical Association, 2016).

9.3 Effets du refroidissement rapide sur le cerveau, les nerfs et les muscles des salmonidés

9.3.1 Absence de nocicepteurs sensibles au froid

Des expériences électrophysiologiques sur des truites arc-en-ciel ont détecté divers nocicepteurs répondant à des températures très élevées, des forces très élevées, un pH bas et certains produits chimiques qui se lient aux récepteurs nociceptifs de mammifères. Toutefois, bien qu'elles l'aient cherchée, ces expériences n'ont pas constaté la présence du nocicepteur répondant au froid qu'on trouve chez d'autres vertébrés (Ashley et coll., 2006, 2007). De plus, des données de biologie moléculaire montrent que le poisson-zèbre ne possède pas d'orthologue TRPM8 et que les deux paralogues TRPA1 du poisson-zèbre ne sont pas thermosensibles (Chen et coll., 2016). TRPM8 est aussi connu sous le nom de CMR1 (*cold and menthol receptor 1*), et des protéines de TRPM8 sont nécessaires à la nociception du froid chez les humains. Chez les salmonidés présentant des réponses comportementales au refroidissement, elles ne sont donc probablement pas causées par la stimulation de nocicepteurs. Elles sont plutôt une réponse à la stimulation des récepteurs thermiques agissant dans la thermorégulation comportementale, ce qui signifie que les poissons recherchent une eau plus chaude.

9.3.2 Récepteurs thermiques du cerveau

Les neurones thermosensibles intervenant dans la thermorégulation comportementale des poissons se situent dans le noyau préoptique. Le refroidissement de cette partie du cerveau cause le déplacement du poisson vers des eaux plus chaudes, tandis que son réchauffement amène le poisson à se déplacer vers de l'eau plus froide, si la fourchette de températures le permet (Crawshaw, 2011). Lors du refroidissement rapide, le poisson ne peut pas choisir la température, mais son comportement natatoire peut augmenter, car il recherche activement une eau plus chaude non disponible (par exemple Becker et coll., 1977). Ce comportement persiste jusqu'à ce que la faible température réduise l'activité cérébrale ou musculaire. En cas de transfert abrupt dans de l'eau réfrigérée, il faut du temps au cerveau pour se refroidir (Stevens et Fry, 1970, 1974; voir aussi la section 9.3.3 : *Effets du refroidissement sur les fonctions cérébrales*).

9.3.3 Effets du refroidissement sur les fonctions cérébrales

Il existe très peu de données concernant les effets du refroidissement rapide sur les fonctions cérébrales des poissons. La conduction nerveuse de poissons-chats acclimatés à 24 °C est bloquée à 3 °C et, chez des poissons acclimatés à 10 °C, elle est bloquée à 1 °C (Prosser et Farhi, 1965). En général, les réflexes sont inhibés à des températures légèrement plus élevées que celles auxquelles la conduction nerveuse est bloquée (Prosser et Farhi, 1965). Par ailleurs, les potentiels évoqués visuels (PEV, réponse du cerveau à un faisceau lumineux) ont servi à estimer les fonctions cérébrales de la truite arc-en-ciel (Kestin et coll., 1991). Quand des truites arc-en-ciel sont maintenues sur un côté sur un lit de glace pilée à 2 °C, le PEV diminue progressivement. La température cérébrale n'est pas mesurée, mais étant donné que les poissons sont à l'air (ce qui déclenche une bradycardie réflexe importante), le taux de refroidissement est probablement nettement plus lent que ce qu'il serait dans l'eau. De plus, quand les truites sont retirées de l'eau, elles font de « vigoureuses tentatives d'échapper » à la contrainte en se tournant et se débattant dans des épisodes durant jusqu'à 20 secondes, entre lesquels elles semblent relativement calmes. Ces expériences ne comportaient pas de moyen de contrôle retenant les truites sur le côté pendant le refroidissement. Malgré l'intérêt de leurs résultats, ils ne nous apprennent pas grand-chose sur ce qui se passe pendant l'abattage dans un coulis de glace en aquaculture. Une seule étude se sert de la méthode des PEV pendant l'euthanasie de mammifères (Cartner et coll., 2007), mais l'importance de ses résultats a été remise en question (Hawkins et coll., 2016). Il reste que l'enregistrement des PEV est une méthode intéressante et que l'emploi de techniques modernes d'enregistrement des données capturant des données pertinentes pendant que les poissons sont dans l'eau (contrairement aux techniques actuelles d'enregistrement des PEV qui nécessitent de retirer les poissons de l'eau) est susceptible d'apporter de précieux renseignements dans de futures études.

9.3.4 Effets du refroidissement abrupt sur la fonction musculaire

Des baisses abruptes de la température réduisent abruptement la capacité des muscles des poissons à accomplir efficacement leur fonction, en grande partie parce que la vitesse de relaxation est très thermosensible et qu'elle ralentit considérablement si le muscle refroidit (Luiker et Stevens, 1994; Rome et Swank, 1992). Une diminution de la température de 10 °C réduit de 300 % la vitesse de relaxation. Par conséquent, quand on observe le comportement pendant un refroidissement rapide, il est difficile de déterminer si la baisse d'activité est attribuable à la diminution des fonctions cérébrales ou nerveuses ou à une réponse au stress comportementale minimale, à cause de la diminution concomitante considérable de la fonction musculaire. De même, si l'on observe la diminution de mouvements respiratoires (par exemple des mouvements operculaires) pendant le refroidissement rapide, il est difficile de déterminer si elle s'explique par la réduction des fonctions cérébrales ou nerveuses ou par la diminution de la fonction musculaire.

9.4 Facteurs de stress pendant l'abattage dans un coulis de glace

La réglementation visant les résidus ne permet pas l'utilisation de médicaments pendant l'abattage. C'est pourquoi plusieurs autres méthodes sont adoptées dans les salmonicultures. Les producteurs de truites en eau douce, particulièrement en Ontario, recourent souvent à l'abattage dans un coulis de glace (R. Moccia, communication personnelle). Comme on l'a vu précédemment, le refroidissement rapide en eau douce n'est pas nécessairement léthal pour les salmonidés. La cause de la mort pendant l'abattage dans un coulis de glace pourrait alors être

l'asphyxie due aux effets conjugués de la diminution de la teneur en oxygène de l'eau et de l'arrêt de l'irrigation des branchies (en raison de l'effet de la basse température sur les muscles respiratoires et la conduction nerveuse).

Il existe alors trois sources de stress pendant l'abattage dans un coulis de glace : (1) la manipulation et l'entassement, (2) le refroidissement et (3) la possibilité de faibles augmentations de la concentration de CO₂ et d'hypoxie. L'importance de chacun des facteurs de stress a été estimée séparément. Chez l'omble chevalier, en l'absence de manipulation conjuguée à l'entassement, le refroidissement rapide n'a pas d'effet sur le comportement du poisson et un léger effet sur le cortisol (Seth et coll., 2013). Chez le saumon de l'Atlantique, en l'absence de manipulation, le refroidissement rapide ne cause pas d'augmentations significatives des niveaux de glucose sanguin, de lactate, de cortisol ou de sodium, tandis que le refroidissement avec manipulation entraîne des indicateurs de stress élevé (Foss et coll., 2012). Une étude antérieure, dans laquelle des saumons de l'Atlantique sont capturés au filet, montre que le refroidissement des poissons vivants (après capture au filet) cause une légère augmentation du cortisol, du glucose, du lactate et de l'osmolalité, alors que l'entassement cause des augmentations plus grandes de toutes les variables et que ses effets ne sont pas atténués par le refroidissement des poissons vivants (Skjervold et coll., 2001). De faibles concentrations de CO₂ (50 ml de CO₂/L d'eau), comme l'hypothermie, auraient des effets anesthésiants (Kugino et coll., 2016) par la dépression du système nerveux central conduisant à une perte de conscience (voir aussi la *section 9.5 : Abattage dans un coulis de glace avec ajout de CO₂*, qui traite des concentrations élevées de CO₂). Par ailleurs, il a été montré que l'hypoxie aiguë entraîne une réponse au stress physiologique : par exemple, la diminution de la saturation en oxygène de 90 à 40 % en 2 heures cause l'augmentation des concentrations de cortisol plasmatique, de lactate et de chlorure chez le saumon de l'Atlantique (Remen et coll., 2012). Par conséquent, la manipulation conjuguée à l'entassement pourrait être le facteur de stress le plus important pendant l'abattage dans un coulis de glace, mais elle est inévitable. Le refroidissement serait alors le plus petit facteur de la réponse totale au stress avant la mort par abattage dans un coulis de glace, mais il reste un facteur de stress en soi.

Le bien-être du poisson pendant tout le processus d'abattage dans un coulis de glace, tel qu'il est pratiqué aujourd'hui au Canada, fait l'objet d'un nombre très limité d'articles évalués par les pairs. Des études sur ces méthodes permettraient de déterminer la cause réelle de la mort pendant l'abattage dans un coulis de glace et seraient très utiles à notre compréhension du bien-être des poissons pendant ce procédé.

9.5 Abattage dans un coulis de glace avec ajout de CO₂

Par le passé, le refroidissement avec ajout de dioxyde de carbone (CO₂) a servi à l'euthanasie et pendant l'abattage et la transformation des salmonidés (Erikson et coll., 2006). Bien que cette méthode soit peu courante à l'heure actuelle dans l'industrie, il se peut que certains producteurs l'utilisent, c'est pourquoi nous l'examinons brièvement ici.

La plupart des espèces perdent connaissance après environ 2 à 3 minutes d'hypoxie et d'hypercapnie (Robb, 2001; Wall, 2001; Robb et Kestin, 2002) et meurent en l'absence d'oxygène. Les poissons réagissent aux concentrations élevées de CO₂ en se débattant et par une réponse au stress. Cela pourrait être dû à la production de phénol par la dissolution du CO₂ dans

l'eau et au fait que, comme on l'a indiqué précédemment, les poissons possèdent des nocicepteurs réagissant à un pH bas (Ashley et coll., 2007). Seth et coll. (2013) ont constaté que le CO₂ avait des effets importants sur le comportement de l'omble chevalier (rapporté anecdotiquement comme étant « un comportement prononcé de lutte et de fuite ») et sur ses concentrations de cortisol, ce qui indique une réponse au stress comportementale et physiologique considérable. Il est important de souligner que le grave traumatisme causé par le CO₂ n'est pas atténué par une baisse de la température à 0,25 °C (Seth et coll., 2013). Les conséquences importantes sur le bien-être de l'augmentation abrupte des concentrations de CO₂ sont aussi examinées dans la *section 6 : Qualité de l'eau dans les systèmes d'aquaculture en recirculation*. Ajoutons que le stress causé par le CO₂ est associé à un déclassement de la qualité des filets (Merkin et coll., 2018).

9.6 Références

- American Veterinary Medical Association (AVMA) (2016). *AVMA Guidelines for the Humane Slaughter of Animals: 2016 Edition*, consultable sur <https://www.avma.org/sites/default/files/resources/Humane-Slaughter-Guidelines.pdf>.
- Ashley, P.J., L.U. Sneddon et C.R. McCrohan (2006). Properties of corneal receptors in a teleost fish, *Neuroscience Letters*, vol. 41, p. 165-168.
- Ashley, P.J., L.U. Sneddon et C.R. McCrohan (2007). Nociception in fish: Stimulus-response properties of receptors on the head of trout *Oncorhynchus mykiss*, *Brain Research*, vol. 116, p. 47-54.
- Becker, C.D., R.G. Genoway et M.J. Schneider (1977). Comparative cold resistance of three Columbia River organisms, *Transaction of the American Fisheries Society*, vol. 106(2), p. 178-184.
- Brett, J.R. (1952). Temperature tolerance in young Pacific salmon genus *Oncorhynchus*, *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, vol. 9, p. 265-323.
- Brett, J.R. et D.F. Alderdice (1958). The resistance of cultured young chum and sockeye salmon to temperatures below 0°, *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, vol. 15, p. 805-813.
- Browning, H. et W. Veit (2020). Is humane slaughter possible?, *Animals*, vol. 10(5), p. 799.
- Cartner, S.C., S.C. Barlow et T.J. Ness (2007). Loss of cortical function in mice after decapitation, cervical dislocation, potassium chloride injection, and CO₂ inhalation, *Comparative Medicine*, vol. 57, p. 570-573.
- Chen, S., C.N. Chiu, K.L. McArthur, J.R. Fetcho et D.A. Prober (2016). TRP channel mediated neuronal activation and ablation in freely behaving zebrafish, *Nature Methods*, vol. 13(2), p. 147-150.
- Crawshaw, L.I. (1979). Responses to rapid temperature change in vertebrate ectotherms, *American Zoologist*, vol. 19, p. 225-237.

- Crawshaw, L.I. et J.E. Podrabsky (2011). Temperature preference: Behavioral responses to temperature in fishes, dans Farrell, A.P. (dir.). *Encyclopedia of Fish Physiology*, Academic Press, Cambridge, États-Unis, p. 758-764.
- Elliott, J.M. et J.A. Elliott (2010). Temperature requirements of Atlantic salmon *Salmo salar*, brown trout *Salmo trutta* and Arctic charr *Salvelinus alpinus*: Predicting the effects of climate change, *Journal of Fish Biology*, vol. 77, p. 1793-1817.
- Erikson, U., L. Hultmann et J.E. Steen (2006). Live chilling of Atlantic salmon (*Salmo salar*) combined with mild carbon dioxide anaesthesia: I. Establishing a method for large-scale processing of farmed fish, *Aquaculture*, vol. 252, p. 183-198.
- Foss, A., E. Grimsbø, E. Vikingstad, R. Nortvedt, E. Slinde et B. Roth (2012). Live chilling of Atlantic salmon: Physiological response to handling and temperature decrease on welfare, *Fish Physiology and Biochemistry*, vol. 38, p. 565-571.
- Guderley, H. et P. Blier (1988). Thermal acclimation in fish: Conservative and labile properties of swimming muscle, *Canadian Journal of Zoology*, vol. 66, p. 1105-1115.
- Hawkins, P., M.J. Prescott, L. Carbone, N. Dennison, C. Johnson, I.J. Makowska, N. Marquardt, G. Readman, D.M. Weary et H.D.R. Golledge (2016). A Good Death? Report of the Second Newcastle Meeting on Laboratory Animal Euthanasia, *Animals*, vol. 6, p. 1-28.
- Hovda, J. et T.J. Linley (2000). The potential application of hypothermia for anesthesia in adult Pacific salmon, *North American Journal of Aquaculture*, vol. 62(1), p. 67-72.
- Kestin, S.C., S.B. Wotton et N.G. Gregory (1991). Effect of slaughter by removal from water on visual evoked activity in the brain and reflex movement of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), *Veterinary Record*, vol. 128, p. 443-446.
- Kugino, K., S. Tamaru, Y. Hisatomi et T. Sakaguchi (2016). Long-duration carbon dioxide anesthesia of fish using ultra fine (nano-scale) bubbles, *PLoS ONE*, vol. 11(4), n° e0153542.
- Luiker, E.A. et E.D. Stevens (1994). Effect of temperature and stimulus train duration on the departure from theoretical maximum work in fish muscle, *Canadian Journal of Zoology*, vol. 72, p. 956-969.
- Merkin, G.V., L.H. Stien, K. Pittman et R. Nortvedt (2018). The effect of stunning methods and season on muscle texture hardness in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.), *Journal of Food Science*, vol. 79(6), n° E1137-1141.
- McCullough, D.A. (2001). Are coldwater fish populations of the United States actually being protected by temperature standards?, *Freshwater Reviews*, vol. 3, p. 147-199.
- Prosser, C.L. et E. Farhi (1965). Effects of temperature on conditioned reflexes and on nerve conduction in fish, *Journal of Comparative Physiology (Zeitschrift für vergleichende Physiologie)*, vol. 50, p. 91-101.
- Remen, M., F. Oppedal, T. Torgersen, A.K. Imsland et R.E. Olsen (2012). Effects of cyclic environmental hypoxia on physiology and feed intake of post-smolt Atlantic salmon: Initial responses and acclimation, *Aquaculture*, vol. 326-329, p. 148-155.

Robb, D.H.F. (2001). The relationship between killing methods and quality, dans Kestin, S. et P. Wariss (dir.). *Farmed Fish Quality*, Blackwell Science Publishers, Oxford, Royaume-Uni, p. 220-233.

Robb, D.H.F. et S.C. Kestin (2002). Methods used to kill fish: Field observations and literature reviewed, *Animal Welfare*, vol. 11, p. 269-282.

Rome, L.C. et D. Swank (1992). The influence of temperature on power output of scup red muscle during cyclical length changes, *Journal of Experimental Biology*, vol. 171, p. 261-281.

Roth, B., A.K. Imsland et A. Foss (2009). Live chilling of turbot and subsequent effect on behaviour, muscle stiffness, muscle quality, blood gases, and chemistry, *Animal Welfare*, vol. 18, p. 33-41.

Sauter, S.T., J. McMillan et J. Dunham (2001). Salmonid behavior and water temperature, United States Environmental Protection Agency, Issue Paper 1, (EPA-910-D-01-001).

Seth, H., M. Axelsson, H. Sundh, K. Sundell, A. Kiessling et E. Sandblom (2013). Physiological responses and welfare implications of rapid hypothermia and immobilisation with high levels of CO₂ at two temperatures in Arctic char (*Salvelinus alpinus*), *Aquaculture*, vol. 402-403, p. 146-151.

Skjervold, P.O., S.O. Fjæra, P.B. Østby et O. Einen (2001). Live-chilling and crowding stress before slaughter of Atlantic salmon (*Salmo salar*), *Aquaculture*, vol. 192, p. 265-280.

Stevens, E.D. et F.E.J. Fry (1970). The rate of thermal exchange in a teleost, *Tilapia mossambica*, *Canadian Journal of Zoology*, vol. 48, p. 221-226.

Stevens, E.D. et F.E.J. Fry (1974). Heat transfer and body temperature in non-thermoregulatory teleosts, *Canadian Journal of Zoology*, vol. 52, p. 1137-1143.

Wall, A.J. (2001). Ethical considerations in the handling and slaughter of farmed fish, dans Kestin, S. et P. Wariss (dir.). *Farmed Fish Quality*, Blackwell Science Publishers, Oxford, Royaume-Uni, p. 108-115.

Tableau 9.1. Températures létales inférieures pour les salmonidés.

Espèce	Température d'acclimatation (°C)				Température létale inférieure initiale (°C)	Référence
	2,6	5	10	15		
<i>Onchorynchus nerka</i>		0,0	3,1	4,1		Brett, 1952
<i>O. tshawytscha</i>			0,8	2,5		Brett, 1952
<i>O. keta</i>			0,5	4,7		Brett, 1952
<i>O. kisutch</i>	-0,1	0,2	1,7	3,5		Brett et Alderdice, 1958
<i>Salmo salar</i>					-0,8	Elliott et Elliott, 2010
<i>S. trutta</i>					-0,8	Elliott et Elliott, 2010
<i>S. alpinus</i>					-1,0	Elliott et Elliott, 2010