





**Occurrence de saumons atlantique (*Salmo salar*) estuariens dans la région de la baie d'Ungava (Nunavik, QC) confirmée par la chimie des otolithes et la morphologie des écailles**

**Par Caroline Brûlé**

**Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi en vue de l'obtention du grade de Maître ès sciences (M. Sc.) en ressources renouvelables**

Québec, Canada

© Caroline Brûlé

## RÉSUMÉ

Les populations de salmonidés présentent des comportements migratoires diversifiés, variant de la résidence en eau douce jusqu'à l'anadromie marine. Les connaissances locales autochtones et la scalimétrie rapportent des patrons migratoires atypiques chez le saumon atlantique (*Salmo salar*) de la baie d'Ungava (Nunavik, Québec), dans l'extrémité nordique de son aire de répartition nord-américaine. En effet, des saumons décrits comme estuariens semblent passer l'été en estuaire et l'hiver en eau douce, alors que d'autres individus de la même rivière montrent des comportements migratoires typiques des saumons anadromes ou des ouananiches. Malgré l'originalité du phénomène et ses implications pour la gestion des populations dans un contexte de changement climatique et d'exploitation, la littérature scientifique demeure très pauvre en information sur le sujet. L'objectif général de cette étude est d'évaluer la correspondance entre la morphologie des écailles et la chimie des otolithes pour confirmer les migrations atypiques des saumons atlantique de la rivière Koksoak. Une méthode d'interprétation des transects chimiques d'otolithes a été développée à partir de 85 saumons provenant du réseau hydrographique de la rivière Koksoak au Nunavik et de 13 réseaux hydrographiques du Québec méridional. Une approche combinant les concentrations de Zn, Sr, Mg, Mn et Ba dans les otolithes permet de détecter efficacement les migrations des saumons atlantique. Les histoires de vie inférées par les deux méthodes concordent fortement, confirmant l'efficacité de la lecture des écailles. Cette information consolide la pertinence d'utiliser cette méthode non létale, facile d'usage et donc privilégiée pour le suivi des mesures de gestion et de conservation destinées à cette espèce emblématique. Couplée aux connaissances locales autochtones et à la scalimétrie, la chimie de l'otolithe des saumons atlantique du système de la rivière Koksoak atteste l'occurrence de saumons effectuant des migrations estuariennes dans la région de la baie d'Ungava. Ces estuariens représentaient respectivement 24% et 74% des saumons échantillonnés par barrière de comptage en 2018 et 2019.

**MOTS-CLÉS :** Saumon estuarien, saumon atlantique, scalimétrie, écailles, chimie des otolithes, Ungava, Nord-du-Québec, Nunavik.

## ABSTRACT

Salmonid populations manifest diverse migratory behaviors, ranging from freshwater residency to marine anadromy. Scalimetry of Atlantic Salmon (*Salmo salar*) from the northern end of the North American range has notably revealed atypical migratory patterns. In the Ungava Bay region, salmon described as estuary growth seem to spend the summer in estuaries and winter in freshwater, while other individuals from the same river exhibit typical behaviors of marine anadromy or freshwater residency. Despite the originality of this phenomenon and its implications for population management in a context of climate change and exploitation, the scientific literature remains very poor in information on the subject. The general objective of this study was to assess the correspondence between scale morphology and otolith chemistry in order to confirm the atypical migrations of Atlantic Salmon from the Koksoak River. A method of interpreting otolith chemical transects was developed using 85 salmons from the Koksoak River hydrographic network in Nunavik and 13 hydrographic networks in southern Quebec. An approach combining the concentrations of  $^{64}\text{Zn}$ ,  $^{88}\text{Sr}$ ,  $^{24}\text{Mg}$  and  $^{138}\text{Ba}$  in the otoliths makes it possible to efficiently detect the migrations of Atlantic Salmon. The life history inferred by these two methods strongly matched, confirming the effectiveness of scale reading. This information consolidates the relevance of using this non-lethal method, easy to use and therefore preferred for monitoring measures for the sustainable management and conservation of this emblematic species. In addition, this study confirms the occurrence of salmon making estuarine migrations in the Ungava Bay region. These estuary-growth fish accounted for 24% and 74% of the Atlantic salmon sampled by fish counting facilities in 2018 and 2019, respectively.

Key words: Estuary, migration, scalimetry, otolith chemistry, Ungava, Atlantic Salmon

## TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ .....	ii
ABSTRACT .....	iii
LISTE DES FIGURES .....	v
LISTE DES TABLEAUX .....	vii
LISTE DES ANNEXES ( <i>APPENDIX</i> ).....	viii
REMERCIEMENTS.....	ix
AVANT-PROPOS .....	xi
INTRODUCTION GÉNÉRALE .....	1
La diversité migratoire des salmonidés.....	2
La diversité migratoire du saumon atlantique.....	5
Les saumons atlantique de la rivière Koksoak (Nunavik, Qc).....	10
La lecture d'écailles et la chimie des otolithes comme méthode de suivi des populations .....	12
Objectifs du mémoire de maîtrise .....	15
CHAPITRE 1.....	16
OCCURRENCE OF A MIGRATORY CONTINGENT OF ESTUARY GROWTH ATLANTIC SALMON ( <i>SALMO SALAR</i> ) IN UNGAVA BAY (NUNAVIK, QC) REVEALED BY SCALE MORPHOMETRICS AND OTOLITH CHEMISTRY .....	16
Introduction.....	16
Materials and methods.....	20
Sample collection.....	20
Scalimetry.....	23
Otolith preparation and chemistry analysis.....	26
Otolith chemistry data analysis.....	27
Correspondence between scale-reading and otolith chemistry methods.....	31
Results .....	32
Age and life history events revealed by scalimetry .....	32
Age and life history events revealed by otolith chemistry method .....	34
Correspondence between scalimetry and otolith chemistry methods .....	38
Migratory contingents in two large Koksoak tributaries during the 2018-2019 spawning runs .....	41
Discussion.....	41
Reliability of scalimetry.....	42
Insight from otolith chemistry .....	45
Acknowledgements.....	49
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	51
Occurrence des saumons atlantique estuariens dans la rivière Koksoak.....	51
Considérations de gestion des ressources renouvelables .....	53
Chimie des otolithes.....	56
RÉFÉRENCES .....	58

## LISTE DES FIGURES

- Figure 1 Écailles de trois saumons vierges dont la croissance après la smoltification, d'une durée de deux ans dans chaque cas, a été marine (A), estuarienne (B) et mixte (C). La lettre « S » identifie la marque de smoltification. Tiré de Robitaille *et al.* (1982), reproduit avec la permission de M. Jean Robitaille..... 12
- Figure 2 Combinaison entre la photographie et la composition microchimique en isotope  $^{88}\text{Sr}$  (ppm) et  $^{64}\text{Zn}$  (ppm) d'un transect de laser réalisé au LA-ICP-MS de A) une écaille (grossissement 16X) B) la coupe transversale centrale d'un otolithe *Sagitta* (grossissement 50X) de saumon atlantique (*Salmo salar*) d'écotype migratoire « estuarien » provenant de la rivière aux Mélézes, dans le réseau hydrographique de la rivière Koksoak, Nunavik, QC. Les flèches indiquent les marques de croissance de l'individu (spécimen n° SASA-1), dont la formule d'âge est « 4T,3+ ». La ligne pointillée met en évidence la zone de transition (T) sur les structures calcifiées, déterminée par A) l'analyse morphologique de l'écaille B) le patron microchimique de  $^{88}\text{Sr}$  (© Brûlé 2020, données non-publiées)..... 14
- Figure 3 Sampled salmon rivers through the Province of Quebec © Government of Québec ..... 20
- Figure 4 Scale reading method applied to (A) freshwater growth (male, 104 g, 220 mm, 14-09-2018) (B) estuary growth (female, 2050 g, 593 mm, 16-08-2019) (C) sea growth (female, 2602 g, 672 mm, 15-09-2018) and (D) mixed growth (estuary-sea, female, 2720 g, 643 mm, 17-08-2019) Atlantic Salmon scales captured in the Koksoak River, Nunavik, Qc. For each specimen, focus of the scale is designated, as well as edge of the scale, annuli counts and smoltification zone ("Smolt."). ..... 25
- Figure 5 Scale reading morphometry (A) and otolith chemistry transect (B) of an estuary growth salmon which exhibits a previous spawning mark on its scales. The smoltification zone ("Smolt.") is located on both structures. The specimen was captured in the Du Gué River (Koksoak River, Nunavik, QC) on August 17, 2019, in a fish counting fence (Male, 633 mm, 2534 g). Light grey zones mark the regions of the profile selected as data corresponding to brackish water. .... 33
- Figure 6 Elemental profile of (A) fresh-water growth (Male, 104 g, 220 mm, 14-09-2018) (B) estuary growth (female, 2050 g, 593 mm, 16-08-2019) (C) sea growth (female, 2602 g, 672 mm, 15-09-2018) and (D) mixed growth (estuary-sea, female, 2720 g, 643 mm, 17-08-2019) Atlantic Salmon otolith captured in the Koksoak River, Nunavik, QC. For each specimen, core section of the transect is designated, as well as annuli counts and smoltification zone ("Smolt."). Light grey and dark grey zones mark the regions of the profile selected as data corresponding to brackish water and seawater growth, respectively. They correspond to the same specimen as figure 3. Dotted lines represent threshold concentrations. The 95% confidence interval are presented with lower and upper bounds around the mean. .... 35
- Figure 7 Localisation of the mean 1-year-old annuli on  $^{64}\text{Zn}$  and  $^{24}\text{Mg}$  otolith isotopic profiles ( $\pm$  SE) of northern salmons captured in the Koksoak River (A; B, C, D), freshwater growth salmons from Lac Saint-Jean (E) and southern sea growth salmons captured in southern Quebec rivers (F; G; H; I; J; K; L; M; N; O; P). The minimum and maximum of the 1-year-old mark from each group correspond to both side of the grey rectangle. X axis are not similar between each rectangle to maximize visualisation. The 95% confidence intervals are presented with lower and upper bounds around the mean. .... 36

Figure 8 Mean localisation of the smoltification zone on <sup>88</sup>Sr and <sup>138</sup>Ba otolith isotopic profile (± SE) of northern salmon captured in the Koksoak River (A; B, C, D), freshwater growth salmon from Lac Saint-Jean (E) and southern sea growth salmon captured in southern Quebec rivers (F; G; H; I; J; K; L; M; N; O; P). Mean beginning and end of the smoltification zone (“Smolt.”) are defined by vertical black lines. Dotted horizontal lines emphasizes threshold values for <sup>88</sup>Sr (1500 ppm) in red, and for <sup>138</sup>Ba (0.5 ppm and 2 ppm) in blue. X axis are not similar between each rectangle to maximize visualisation. The 95% confidence intervals are presented with lower and upper bounds around the mean. ....37

Figure 9 Age bias plots (A.1; B.1), age frequency plots (A.2; B.2) and average coefficient of variation (ACV) between otolith chemistry and scale-reading method for (A) smoltification age for all salmon (B) post-smoltification age for virgin salmon for both age parameters, the ACV did not exceed the 5% level of accuracy (Campana 2001; Ogle 2016). Therefore, scale reading and otolith chemistry methods assess similar results with satisfying precision for these age parameters (Campana 2001; Gallagher *et al.* 2016). ....40

Figure 10 Proportion of each migratory contingent from systematic sampling by fish counting fence in two tributaries of the Koksoak River in 2018 and 2019 .....41

## LISTE DES TABLEAUX

Table 1 Sampling type (administrative regions of Province of Quebec), dates, sample size and mean fork length [min,max] of Atlantic Salmon studied by otolith chemistry by region and body of water .....	22
Table 2 General criteria assessing life history stages onto chemical otolith transect.....	30
Table 3 Cross-validation classification of salmons to their migratory contingent based on the otolith chemistry method (e.g. concentrations of Sr, Ba, Mg and Zn in otoliths) and the scale-reading method (e.g. width of their post-smoltification winter annuli on their scales). $P_{agree}$ represents de percentage of indivuals of each scale-determined contingent which were correctly classified to the same otolith-determined contingent. Correctly classified individuals are shown in bold. ....	39



## LISTE DES ANNEXES (*APPENDIX*)

Appendix 1 Atlantic Salmon river's watersheds of Ungava Bay (Nunavik, QC) © Government of Québec .....	75
Appendix 2 Methodology for mounting scales on slide .....	76
Appendix 3 Scale reading morphometry (A & B) and otolith chemistry transect (C & D) of two smolt salmon. Both specimens were captured in Lac Saint-Jean (Saguenay-Lac-Saint-Jean) between 23 <sup>th</sup> and 25 <sup>th</sup> July 2019 by recreative fisheries. (A & C) 243 mm. (B & D) 225 mm. ....	78
Appendix 4 Otolith chemistry transect of four estuary growth salmon from the Du Gué River (Koksoak River, Nunavik, QC) captured between 17 <sup>th</sup> and 20 <sup>th</sup> Aug 2019 in a fish counting fence which exhibit a previous spawning mark on their scales (not showed). The smoltification zone ("Smolt.") is located. Years corresponding to a spawning mark on the scale are identified by an asterisk "*". (A) Male, 2534 g, 633 mm, (B) Female, 3209 g, 680 mm (C) Male, 2472 g, 632 mm (D) Female, 2913 g, 673 mm. ....	79

## REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier mon directeur, le professeur Pascal Sirois, de m'avoir accueilli dans son laboratoire pour me permettre de réaliser ce projet qui m'enthousiasmait pleinement. Merci de m'avoir fait confiance; cela m'a inspiré à donner mon maximum durant ces deux années d'études. Mes remerciements vont également à ma co-directrice Véronique Leclerc, biologiste du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP), pour son encadrement, sa belle énergie et son humanité. Grâce à son soutien, j'ai pu garder le cap malgré les aléas de la vie en ces temps pandémiques.

J'aimerais aussi souligner ma reconnaissance envers deux biologistes du MFFP, Julien April et Véronique Nadeau, les généreux collaborateurs de ce projet. Vos judicieuses contributions m'ont été salutaires durant tout le processus, des décisions méthodologiques initiales jusqu'aux détails structurels de l'article. J'espère avoir produit un mémoire à la hauteur de votre précieuse expertise.

De plus, ce projet n'aurait pas été possible sans la persévérance et le dévouement de plusieurs collaborateurs *in situ*. Un gros merci à l'équipe de terrain du MFFP avec qui j'ai eu la chance de réaliser la campagne d'échantillonnage sur les tributaires de la rivière Koksoak durant les étés 2018 et 2019, dont principalement Yanick Soulard et Ariel Arsenault. Je veux également remercier les adeptes de la pêche qui ont généreusement contribué au projet en récoltant des échantillons durant leurs sorties respectives : Jean-François Desgagnés, Sonya Lévesque, Maxime Vigneault, Nola Mercier, Émilie Berthiaume, David Cleary, Yani Roberston, Joëlle Guérin, Jean-François Simard, Charles Dufour, Jerry Vollant, Jeff St-Onge, Réjean Basque, Charlotte Picard, Daniel Lafrenière, Marc-Olivier Cotton, George Perrault, Langis Côté, Michel Lemay, Jean-Michel Lemay, Amélie Thériault et Olivier Thériault. Vous avez toute ma reconnaissance ; votre rigoureuse participation scientifique à l'été 2020 a sauvé un an de mon projet de maîtrise! Merci également à Rémi Lesmerises, directeur général de la ZEC Saumon Gaspé, au Conseil d'Innu Takuaikan Uashat mak Mani-utenam (ITUM), à la Nation Micmac de Gespeg, ainsi qu'à Valérie Bujold et Soazig Lebreton du MFFP pour leur soutien organisationnel à la collecte de ces échantillons.

La lecture d'écaïlles a par ailleurs occupé une part importante de mon projet. À ce propos, je voudrais remercier Denise Deschamps, Vanessa Cauchon, Ariel Arsenault, Peter May et Maylinda Tremblay-Leclerc pour le partage de connaissances. Vous détenez une expertise précieuse qui mérite tous les honneurs.

Un gros merci aux collègues du laboratoire pour le soutien et la bonne humeur durant les mois où j'y ai travaillé : Sonya Lévesque, Louis Landry-Massicotte, Steven Gagné, Enrique Amato Peres et William Fortin. Je salue tout particulièrement Anne-Lise Fortin pour son accueil chaleureux, son encadrement et sa méthode de travail rigoureuse, ainsi qu'Isabelle Allie pour la réalisation des procédures relatives à la chimie des otolithes.

Sur le plan personnel, je tiens à remercier ma famille et mes amis de croire en moi et de me soutenir en toutes circonstances. Merci également à Jérôme « Mario » Légaré pour le toit et les encouragements.

En terminant, ce projet a été rendu possible grâce à la participation financière du Fonds Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies (FRQNT), du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, de la Société du Plan Nord, de la Chaire de recherche sur les espèces aquatiques exploitées (CREAE) et du regroupement Ressources Aquatiques Québec.

## AVANT-PROPOS

Ce mémoire est un travail réalisé dans le cadre du programme de maîtrise en ressources renouvelables à l'Université du Québec à Chicoutimi. Il résulte d'une collaboration entre la Chaire de recherche sur les espèces aquatiques exploitées (CREAE) et le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). Il s'inscrit dans le cadre d'un projet stratégique de la Société du Plan Nord visant la mise à jour et l'acquisition de connaissances sur les populations ichtyologiques dans la région du Nord-du-Québec et réalisé par le MFFP. La structure choisie est celle d'un mémoire sous forme d'article scientifique. Ainsi, le mémoire se constitue de trois chapitres, dont le principal est rédigé en anglais et mis en forme d'un article scientifique. Une introduction générale, en français, vise d'abord à établir le contexte de recherche et une conclusion générale, aussi en français, explore davantage certains points de discussion et termine ce mémoire.

L'article scientifique qui constitue le chapitre central de ce mémoire sera soumis au *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (CJFAS), un périodique scientifique dont les publications sont révisées par les pairs. Suivant l'acceptation du manuscrit, un script utile à la visualisation des transects chimiques des otolithes, développé dans le cadre de ce projet, sera publié sur la page GitHub de Caroline Brûlé. Il pourra être adapté aisément pour de futures études portant sur la sclérochronologie de multiples espèces ichtyennes.

## **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

## *La diversité migratoire des salmonidés*

Les salmonidés naissent et se reproduisent en eau douce dans les lacs et rivières (Scott et Crossman 1974). Entre ces deux étapes de vie, certains y demeurent résidents, alors que d'autres migrent vers d'autres habitats pour s'alimenter et croître (Dodson *et al.* 2013). Ces migrations peuvent, entre autres, varier en termes de distance du lieu natal, de l'habitat, de la durée du séjour, de l'initiation du début de la migration, du stade de maturité atteint à la suite du séjour et de leurs fréquences (Quinn et Myers 2004; Dodson *et al.* 2013; Bond *et al.* 2015; Secor 2015; Birnie-Gauvin *et al.* 2019). En réalité, loin d'être de type dichotomique, la variabilité des patrons migratoires des salmonidés sont interspécifiques tout autant qu'intraspécifiques (Klemetsen *et al.* 2003; Quinn et Myers 2004; Bond 2013; Dodson *et al.* 2013; Bond *et al.* 2015; Ciepiela et Walters 2019). Ces mouvements migratoires peuvent de surcroît prendre différentes formes au sein d'une même population (Jonsson et Jonsson 2001; Bond 2013; Dodson *et al.* 2013; Boel *et al.* 2014; Bond *et al.* 2015; Ciepiela et Walters 2019). Le terme « migration partielle » désigne d'ailleurs la présence sympatrique de spécimens dans un même habitat où une partie de la population est migratrice alors qu'une autre demeure résidente (Klemetsen *et al.* 2003; Boel *et al.* 2014; del Villar-Guerra *et al.* 2014). Un nombre croissant de recherches montre que chez plusieurs espèces de salmonidés, les patrons migratoires – et conséquemment d'histoires de vie – relèveraient plutôt d'un continuum de diversité temporelle et/ou spatiale plutôt que catégories fixes et discriminantes (Quinn et Myers 2004; Cucherousset *et al.* 2005; Pavlov et Savvaitova 2008; Dodson *et al.* 2013; Boel *et al.* 2014; del Villar-Guerra *et al.* 2014; Weitkamp *et al.* 2014; Quinn *et al.* 2016; Birnie-Gauvin *et al.* 2019). Cette plasticité phénotypique migratoire est par exemple déjà mentionnée dans la littérature scientifique pour des espèces telle que la truite brune

(*Salmo trutta*) (Klemetsen *et al.* 2003; Cucherousset *et al.* 2005; Boel *et al.* 2014; del Villar-Guerra *et al.* 2014; Birnie-Gauvin *et al.* 2019; Nevoux *et al.* 2019), l'omble chevalier (*Salvelinus alpinus*) (Spares *et al.* 2015), l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*) (Jensen et Rikardsen 2008), l'omble à tête plate (*Salvelinus confluentus*) (Austin *et al.* 2019) et le Dolly Varden (*Salvelinus malma*) (Bond *et al.* 2015).

Par ailleurs, il importe de souligner le potentiel évolutif des patrons migratoires chez les salmonidés. À l'échelle des populations, une adaptation comportementale résulte de la sélection naturelle dans la mesure où elle permet ultimement la persistance de la population dans l'environnement (Garcia De Leaniz *et al.* 2007). Une réponse phénotypique comportementale peut donc être considérée comme un trait qui procure la plus grande probabilité de reproduction (maximisation du fitness) dans un environnement donné (Garcia De Leaniz *et al.* 2007). Dans cet ordre d'idée, l'initiation d'une migration résulterait des coûts et des bénéfices potentiels perçus de ce comportement à l'échelle de chaque individu (Dodson *et al.* 2013; Bond *et al.* 2015; Quinn *et al.* 2016; Birnie-Gauvin *et al.* 2019). Les coûts de la migration vers l'aval pourraient inclure l'augmentation des risques de mortalité et une dépense énergétique accrue, alors que les bénéfices pourraient comprendre des opportunités alimentaires – et donc de croissance – plus fréquentes ou plus abondantes (Olsson *et al.* 2006; Quinn *et al.* 2016; Jensen *et al.* 2019; Bouchard *et al.* 2020). L'expression d'un comportement migratoire particulier constituerait donc une réponse plastique visant ultimement l'optimisation individuelle du taux de survie et du succès reproducteur potentiel (i.e. « *lifetime fitness* ») (Garcia De Leaniz *et al.* 2007; Nevoux *et al.* 2019; Bouchard *et al.* 2020). Évidemment, la stratégie reproductive spécifique influence intrinsèquement le type de migration, dans la mesure où les salmonidés itéropares peuvent se reproduire à plusieurs

reprises, alors que les sémelpares ne se reproduisent qu'une seule fois avant de mourir (Quinn et Myers 2004; Birnie-Gauvin *et al.* 2019). Quoi qu'il en soit, la propension à migrer et l'expression de ces spécificités migratoires semblent assujetties à un effet combiné d'une influence polygénique (Dodson *et al.* 2013), de l'atteinte de seuils (i.e. « *threshold* ») développementaux critiques à l'échelle individuelle (Dodson *et al.* 2013), de même qu'aux conditions environnementales dans le cours d'eau natal (Klemetsen *et al.* 2003).

Il est en effet probable que la prédisposition génétique (Garcia De Leaniz *et al.* 2007; Gossieaux *et al.* 2020), l'empreinte parentale ou du moins la préexistence de phénotypes migratoires au sein de sa population influencent la migration d'un individu (Dodson *et al.* 2013). Il semble également que l'âge à la maturité soit partiellement tributaire du sexe de l'individu (Klemetsen *et al.* 2003; Birnie-Gauvin *et al.* 2019; Nevoux *et al.* 2019). La taille (i.e. le taux de croissance juvénile, la taille à la smoltification ou la taille à la maturation sexuelle) jouerait également un rôle sur la propension migratoire d'un individu (Cucherousset *et al.* 2005; Dodson *et al.* 2013; Nevoux *et al.* 2019). Cela pourrait être expliqué par la nécessité d'atteindre une taille corporelle suffisante pour supporter le stress métabolique associé à une reproduction ou pour espérer une issue favorable à la compétition sexuelle intraspécifique (Bond 2013; Bond *et al.* 2015). La retraite migratoire en serait d'ailleurs expliqué chez certains salmonidés plus âgés (Bond *et al.* 2015). L'atteinte précoce de la maturité sexuelle serait également liée à la résidence en eau douce (Jonsson et Jonsson 2001; Nevoux *et al.* 2019).

De surcroît, les conditions environnementales biotiques (compétition intra- et interspécifique pour les ressources alimentaires, compétition sexuelle intraspécifique, prédation) et abiotiques (température, régime hydrique) dans le cours d'eau natal



influenceraient la décision migratoire (Quinn et Myers 2004; Cucherousset *et al.* 2005; Olsson *et al.* 2006; Boel *et al.* 2014; Grant *et al.* 2017; Ciepiela et Walters 2019; Nevoux *et al.* 2019; Harvey *et al.* 2020). Par exemple, une étude réalisée sur le Dolly Varden a montré que les individus qui passaient l'été en estuaire présentaient une croissance plus rapide que ceux restés en lac, probablement grâce à l'abondance des ressources alimentaires (Bond 2013). La synchronicité des migrations de smolts observée dans des communautés sympatriques de plusieurs espèces de salmonidés supporte d'autant plus l'influence des facteurs environnementaux (Harvey *et al.* 2020).

#### *La diversité migratoire du saumon atlantique*

Sur l'ensemble de l'aire de répartition du saumon atlantique, deux types de contingents migratoires sont largement reconnus: les saumons anadromes, considérés comme prévalents, et les saumons résidents, moins fréquents mais également répandus (Klemetsen *et al.* 2003; Webb *et al.* 2007; Aas *et al.* 2011; Birnie-Gauvin *et al.* 2019). Une reproduction en eau douce, une migration vers la mer sous forme de smolt et un retour à la rivière natale pour se reproduire résumant globalement le cycle de vie des saumons atlantique anadromes (Klemetsen *et al.* 2003; Aas *et al.* 2011; Moore *et al.* 2013; Birnie-Gauvin et Aarestrup 2019). Les saumons atlantique résidents – aussi appelés saumons non-anadromes, ouananiches ou saumons d'eau douce – passent pour leur part l'entièreté de leur cycle de vie en eau douce (Fortin *et al.* 2009; Aas *et al.* 2011; Hutchings *et al.* 2019). Ils peuvent demeurer en rivière toute leur vie (ouananiche fluviale) (Klemetsen *et al.* 2003), mais si un lac est accessible dans leur réseau hydrographique, ils peuvent aussi y migrer pour s'alimenter et croître avant la reproduction en rivière (ouananiche lacustre), un peu à la manière du cycle de vie des saumons anadromes, mais à plus petite échelle en eau douce (O'Connell et Ash 1993;

Klemetsen *et al.* 2003; Fortin *et al.* 2009; Hutchings *et al.* 2019). Dans ce cas, ils sont en réalité écologiquement parlant potamodromes, c'est-à-dire qu'ils sont des saumons migrants d'eau douce (Secor 2015). La résidence a longtemps été considérée comme étant une obligation (i.e. « *landlocked* »), bien que ce paradigme soit maintenant réfuté (Gowan *et al.* 1994; Klemetsen *et al.* 2003; Hutchings *et al.* 2019). Il a en effet été montré que plusieurs populations résidentes ont pourtant accès facilement à l'eau salée (Scott et Crossman 1974; Aas *et al.* 2011; Hutchings *et al.* 2019). Des saumons atlantiques anadromes et des ouananiches ont été retrouvés en sympatrie dans plusieurs populations (Riley et Power 1987; Verspoor et Cole 1989; Klemetsen *et al.* 2003; Aas *et al.* 2011; Van Leeuwen *et al.* 2016). Il semble qu'aucun mécanisme d'isolement complet ne limite leur reproduction, puisque des individus de contingents différents peuvent se reproduire entre eux et produire des descendants viables (Hutchings et Myers 1985). L'occurrence sympatrique de ces variations migratoires constituerait plutôt l'expression phénotypique de diverses stratégies alternatives stables d'un point de vue évolutif (Hutchings et Myers 1985; Klemetsen *et al.* 2003; Pavlov et Savvaitova 2008; Aas *et al.* 2011; Van Leeuwen *et al.* 2016).

Comme chez les autres salmonidés, le comportement migrateur d'un saumon atlantique résulterait de l'évaluation individuelle des coûts et des bénéfices potentiellement encourus pour son succès reproducteur (Fleming 1996; Dodson *et al.* 2009). Les coûts d'une décision migratoire impliqueraient entre autres une augmentation des risques de mortalité, de même qu'une dépense énergétique élevée (Quinn *et al.* 2016; Strøm 2018; Dadswell *et al.* 2021; Simmons *et al.* 2021). D'un autre côté, l'augmentation substantielle du taux de croissance, étant donné l'augmentation des opportunités d'alimentation, résulterait en une bonification du taux de succès reproducteur subséquent (Debes *et al.* 2020; Simmons *et al.*

2021). La propension des saumons atlantique à développer un comportement migrateur semble également due à des influences additives de facteurs polygéniques, à l'atteinte de seuils dans des processus développementaux individuels et des conditions environnementales du milieu natal (Hutchings et Jones 1998; Garcia De Leaniz *et al.* 2007; Páez *et al.* 2011; Debes *et al.* 2020). De la même façon, le déclenchement de la montaison suite au séjour en mer et les autres migrations subséquentes une fois un premier cycle de reproduction complété résulteraient également de ces influences additives (Moore *et al.* 2013).

La stratégie migratoire des géniteurs influencerait l'expression de la stratégie migratoire résultante chez leurs descendants, dans la mesure où leur phénotype et leur génotype influencent l'atteinte de seuils développementaux relatifs à la propension à migrer (Garcia De Leaniz *et al.* 2007; Páez *et al.* 2011; Van Leeuwen *et al.* 2016; Debes *et al.* 2020; Czorlich *et al.* 2021). Le bagage génétique des parents influencerait donc la proportion de migrants dans la population, bien qu'il n'en constitue pas un prédicteur direct (Páez *et al.* 2011; Van Leeuwen *et al.* 2016; Czorlich *et al.* 2021). Par ailleurs, ces influences polygéniques expliqueraient, du moins en partie, les différences observées de la diversité inter populationnelle des patrons migratoires (Páez *et al.* 2011; Debes *et al.* 2020).

L'atteinte de seuils dans le développement ontogénique relevant de facteurs tel que la taille et la maturité sont, jusqu'à preuve du contraire, les principaux facteurs qui influenceraient le comportement migratoire (Páez *et al.* 2011; Van Leeuwen *et al.* 2016). L'occurrence de tacons précoces, soit de tacons mâles qui atteignent leur maturité sexuelle sans migration antérieure et qui se reproduisent avec les femelles gestantes, en constitue un exemple marquant (Myers 1984; Fleming 1996; Birnie-Gauvin *et al.* 2019). L'atteinte d'un seuil de taille et de condition relève quant à elle d'un point au-delà duquel les saumoneaux

seront suffisamment grands pour supporter les risques associés à la migration, tel que le stress métabolique et la prédation (Tanguy *et al.* 1994; Hutchings et Jones 1998). Au sein d'une même population, les saumoneaux anadromes de plus grande taille présenteraient généralement des taux de retour en rivière plus élevés, et donc une mortalité en mer plus faible (Armstrong *et al.* 2018; Gregory *et al.* 2019). D'un autre côté, leur condition métabolique au moment du déclenchement migratoire serait tout de même suffisamment faible pour qu'une migration vers un habitat plus riche en opportunités de croissance soit bénéfique pour leur succès reproducteur. Conséquemment à un taux de croissance plus faible des saumons dans des rivières de plus hautes latitudes, l'âge à la smoltification augmenterait d'ailleurs suivant un gradient latitudinal (Klemetsen *et al.* 2003).

Les conditions environnementales du milieu natal semblent influencer également la propension des saumons à migrer, ainsi que son déclenchement. D'abord, une distance plus courte entre le milieu natal et l'habitat cible en aval favoriserait une propension à migrer (Simmons *et al.* 2021). De plus, la température de l'eau (Otero *et al.* 2014; Simmons *et al.* 2021), la photopériode (Riley *et al.* 2002; Otero *et al.* 2014) et le débit de l'eau de la rivière (Simmons *et al.* 2021) semblent respectivement jouer un rôle sur le déclenchement de la smoltification des saumoneaux et leur dévalaison subséquente (Moore *et al.* 2013). Conséquemment, certaines caractéristiques de cette première dévalaison tendent à suivre un gradient latitudinal (Schaffer et Elson 1975; Power 1981; Otero *et al.* 2014). Par exemple, la dévalaison des saumoneaux de rivières plus nordiques prend place généralement durant l'été plutôt qu'au printemps (Moore *et al.* 2013).

La valeur seuil de la décision migratoire et ses particularités subséquentes seraient donc sensibles à la sélection évolutive (Fleming 1996; Garcia De Leaniz *et al.* 2007; Páez *et*

*al.* 2011; Birnie-Gauvin *et al.* 2019; Czorlich *et al.* 2021). Cette adaptabilité expliquerait les différentes histoires de vie observables entre les populations en fonction de leur optimum respectif pour leur environnement local (Schaffer et Elson 1975; Klemetsen *et al.* 2003; Garcia De Leaniz *et al.* 2007; Páez *et al.* 2011; Olmos *et al.* 2018). D'ailleurs, un nombre croissant d'études témoignent d'une variabilité des histoires de vie largement plus diversifiée qu'initialement envisagée chez le saumon atlantique, comme c'est d'ailleurs le cas chez de multiples espèces de salmonidés (Fleming 1996; Klemetsen *et al.* 2003; Birnie-Gauvin *et al.* 2019; Erkinaro *et al.* 2019). Par exemple, il semble que certains saumoneaux effectuent un séjour en estuaire avant d'initier une franche migration vers la mer (Brawn 1982; Klemetsen *et al.* 2003; Moore *et al.* 2013; Hayes et Kocik 2014; Weitkamp *et al.* 2014; Birnie-Gauvin *et al.* 2019). Certains saumons noirs passent l'hiver en rivière à la suite de leur reproduction, alors que d'autres retournent immédiatement en mer l'automne même de leur reproduction (Webb *et al.* 2007). De plus, les saumons atlantiques étant itéropares, ils peuvent se reproduire en alternance, c'est-à-dire en passant au moins un an en mer entre chaque reproduction, ou de manière consécutive, plusieurs années de suite (Klemetsen *et al.* 2003; Bøe *et al.* 2020). Dans ce dernier cas, les saumons noirs dévalent la rivière au printemps, se reconditionnent en milieux salés et reviennent en rivière seulement quelques mois plus tard pour se reproduire à nouveau (Reddin *et al.* 2011; Bøe *et al.* 2019; Bøe *et al.* 2020). Ce phénomène est par exemple connu dans les populations des rivières Conne, Gander et Campbellton à Terre-Neuve-et-Labrador (Klemetsen *et al.* 2003; Reddin *et al.* 2011). Dans un même ordre d'idée, le retour en rivière seulement quelques mois après la dévalaison initiale vers la mer semble être un comportement migrateur possible chez le saumon atlantique. Des saumons post-smolts précoces (identifiés « *precocious postsmolts* » ou « *one-sea-summer* (1SS) ») peuvent revenir en rivière pour se reproduire après seulement quelques

mois en mer au lieu d'au moins un an complet (Klemetsen *et al.* 2003; Downton et Reddin 2004; Orell *et al.* 2018). Ces saumons demeurent relativement près de leur rivière natale après leur dévalaison vers des milieux salés au lieu d'entreprendre une longue migration en mer (Klemetsen *et al.* 2003). En outre, des saumons de rivières écossaises (Klemetsen *et al.* 2003) et russes (Whoriskey *et al.* 1996; Whoriskey *et al.* 2000) semblent retourner en rivière plus d'un an avant leur première reproduction. Ainsi, loin d'être homogènes, les populations de saumons atlantique semblent présenter des variations comportementales migratoires conséquemment à leurs adaptations évolutives respectives.

#### *Les saumons atlantique de la rivière Koksoak (Nunavik, Qc)*

En Amérique du Nord, la limite nordique de l'aire de répartition du saumon atlantique se situe dans la Baie d'Ungava, au Nunavik (Scott et Crossman 1974; Webb *et al.* 2007; COSEPAC 2010). On y retrouve quatre rivières à saumon : la rivière Koksoak, la rivière aux Feuilles, la rivière George et la rivière à la Baleine (COSEPAC 2010; April *et al.* 2019). Cependant, il y a peu d'informations actuelles disponibles sur ces populations pour assurer une gestion durable des ressources. Dans les endroits où le saumon atlantique est encore présent au Canada, les stocks sont généralement en déclin (COSEPAC 2010; April *et al.* 2019). Les populations sont souvent désignées par un statut de protection, dont le degré varie en fonction des régions (COSEPAC 2010). Le manque de connaissances est tel que l'unité désignable regroupant ces rivières du Nunavik a été classée dans la catégorie « données insuffisantes » (COSEPAC 2010). Il est en effet difficile d'exercer une gestion des stocks assurant la pérennité de la ressource lorsque les informations écologiques caractérisant les populations étudiées sont partielles ou manquantes (Koed *et al.* 2020). Dans ce contexte, l'une des priorités d'action 2015-2020 de la Société du Plan Nord visait à « accroître les

retombées socioéconomiques des activités fauniques [...] en assurant la pérennité de la ressource », tout en « identifiant le potentiel et les enjeux fauniques par des activités de recherche appliquée » (Société du Plan Nord 2015). Il est reconnu que les écosystèmes du Québec nordique sont encore peu connus et que la faune migratrice, d'une pérennité déjà fragile, est d'autant plus susceptible d'être affectée par les changements climatiques et les activités anthropiques (Société du Plan Nord 2015; Birnie-Gauvin *et al.* 2019; Koed *et al.* 2020). Ainsi, pour assurer la mise en valeur, le développement économique et la pérennité des ressources à l'aide de plans de gestion adaptés, l'acquisition de connaissances actuelles s'avère essentielle (Koed *et al.* 2020).

Quelques études réalisées au Québec nordique témoignent de la présence de contingents migratoires différents au sein du réseau hydrographique de la rivière Koksoak (Hayeur *et al.* 1984; Robitaille *et al.* 1984b; Robitaille *et al.* 1984a; Belzile *et al.* 1990, MFFP données non publiées) (Figure 1). En plus des saumons anadromes et de saumons résidents typiques, d'autres saumons présenteraient des stratégies migratrices particulières impliquant des séjours en estuaire sans migration en mer, ainsi qu'un mélange des deux selon les années. Il s'agirait d'ailleurs de la première observation de patrons migratoires « estuarien » et « mixte » chez le saumon atlantique.

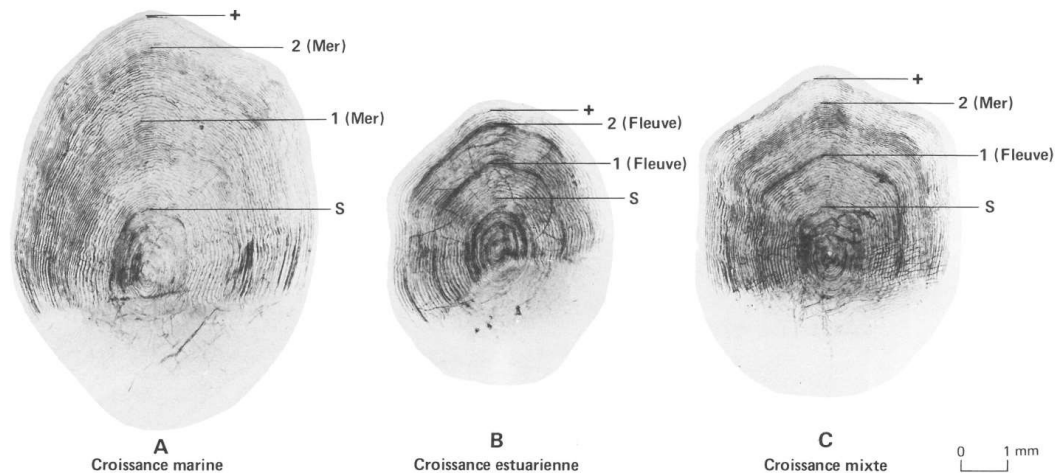


Figure 1 Écailles de trois saumons vierges dont la croissance après la smoltification, d'une durée de deux ans dans chaque cas, a été marine (A), estuarienne (B) et mixte (C). La lettre « S » identifie la marque de smoltification. Tiré de Robitaille *et al.* (1982), reproduit avec la permission de M. Jean Robitaille

### *La lecture d'écailles et la chimie des otolithes comme méthode de suivi des populations*

La scalimétrie, aussi appelée communément « lecture d'écailles », est largement utilisée par les experts de la faune aquatique pour assurer la gestion des saumons atlantique dans son aire de répartition (Rouleau et Bisailon 1991); son efficacité pour le suivi populationnel des saumons anadromes et des ouananiches n'est plus à démontrer (White et Medcof 1968; ICES 2011; Niemelä *et al.* 2016). Dans les études antérieures au Québec nordique mentionnées précédemment, le cycle biologique des saumons atlantique avait été étudié grâce à la somme d'inférences indirectes provenant principalement de la lecture d'écailles, mais aussi de connaissances locales autochtones et d'activités de capture-marquage-recapture dans une moindre mesure (Robitaille *et al.* 1984b; Robitaille *et al.* 1984a; Belzile *et al.* 1990). Considérant la complexité des patrons de croissance, particulièrement ceux des saumons estuariens, il s'avère important d'utiliser une autre méthode de détermination afin de corroborer les résultats obtenus par la scalimétrie (Beamish et McFarlane 1983; Ombredane et Bagliniere 1992; Campana 2001; Riffart *et al.* 2006;



Závorka *et al.* 2014; Campbell *et al.* 2015) *a priori* de l'actualisation des connaissances écologiques sur les saumons de l'Ungava.

Les développements technologiques récents en spectrométrie de masse, notamment le LA-ICP-MS (*Laser Ablation Inductively Coupled Plasma-Mass Spectroscopy*), rendent l'analyse chimique des pièces calcifiées des poissons de plus en plus accessibles (Panfili *et al.* 2002; Walther 2019). Cette technologie permet de réaliser une spectroscopie de masse d'un substrat solide à partir de l'ablation laser par un plasma d'argon à haute température qui excite et ionise les atomes dudit substrat (Panfili *et al.* 2002). L'analyse microchimique des otolithes au LA-ICP-MS permettrait donc de procéder à la validation de l'analyse morphologique de l'écaille (scalimétrie) pour déterminer l'histoire de vie des saumons atlantique (Figure 2). Néanmoins, bien que cette technique soit très précise et fiable, elle ne peut pas être déployée à grande échelle pour une gestion des populations de saumons, car elle nécessite le sacrifice des spécimens étudiés, ainsi qu'un effort technique long et complexe pour analyser les échantillons (Panfili *et al.* 2002; Walther 2019).

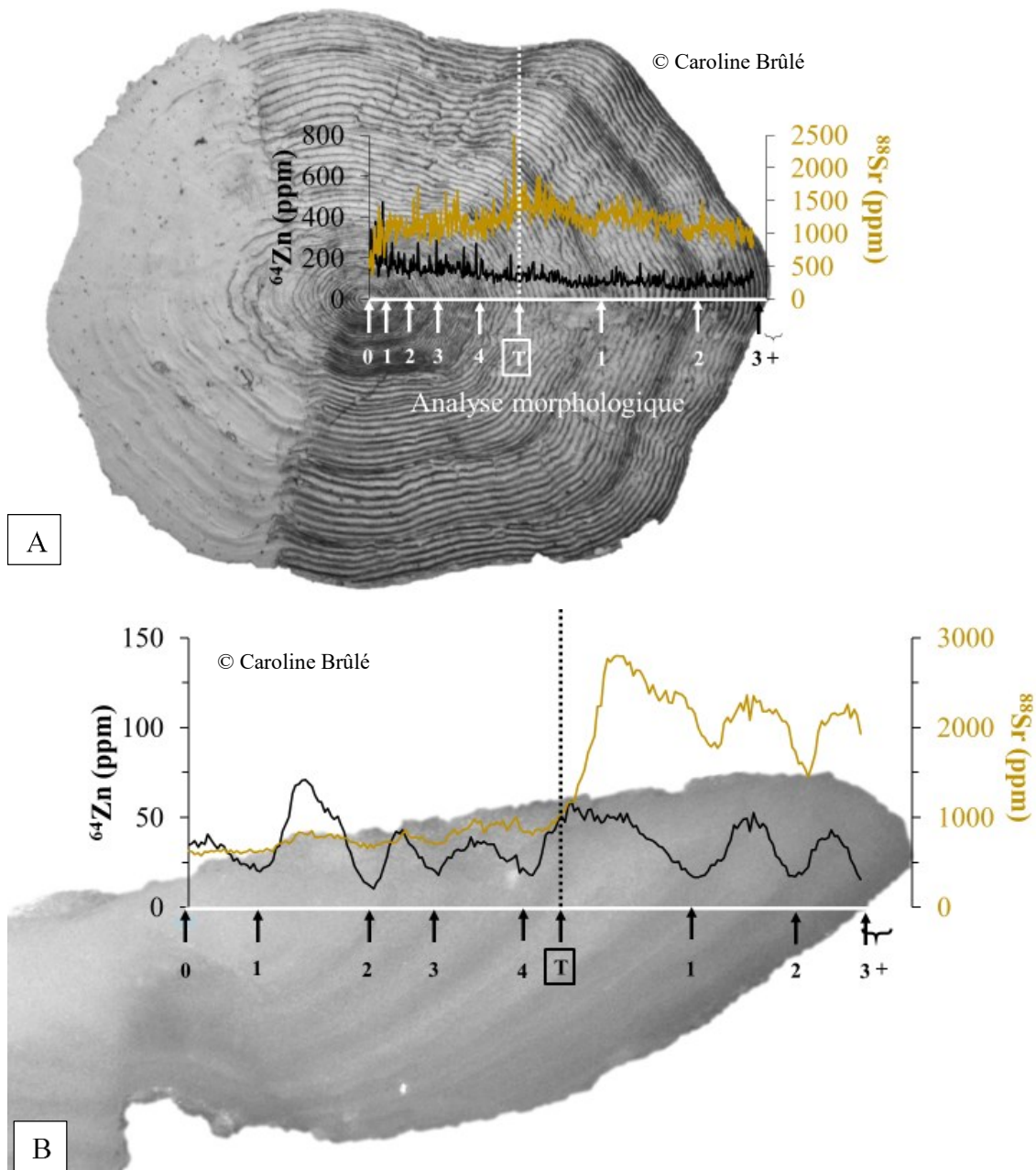


Figure 2 Combinaison entre la photographie et la composition microchimique en isotope  $^{88}\text{Sr}$  (ppm) et  $^{64}\text{Zn}$  (ppm) d'un transect de laser réalisé au LA-ICP-MS de A) une écaille (grossissement 16X) B) la coupe transversale centrale d'un otolithe *Sagitta* (grossissement 50X) de saumon atlantique (*Salmo salar*) d'écotype migratoire « estuarien » provenant de la rivière aux Mélèzes, dans le réseau hydrographique de la rivière Koksoak, Nunavik, QC. Les flèches indiquent les marques de croissance de l'individu (spécimen n° SASA-1), dont la formule d'âge est « 4T,3+ ». La ligne pointillée met en évidence la zone de transition (T) sur les structures calcifiées, déterminée par A) l'analyse morphologique de l'écaille B) le patron microchimique de  $^{88}\text{Sr}$  (© Brûlé 2020, données non-publiées).

### *Objectifs du mémoire de maîtrise*

Cette étude s'inscrit dans un effort global du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (MFFP) pour approfondir les connaissances relatives aux patrons migratoires des saumons atlantique pour assurer une gestion durable des stocks locaux au Nunavik. L'objectif principal de ce mémoire est de confirmer et d'estimer l'occurrence de saumons atlantique réalisant des migrations estuariennes atypiques dans la rivière Koksoak. Pour atteindre cet objectif, nous corroborerons les informations obtenues par la morphologie des écailles avec celles obtenues par la chimie des otolithes. Enfin, nous mesurerons la proportion du patron migratoire estuarien par scalimétrie avec un échantillon de 167 saumons prélevés dans le réseau hydrologique de la Koksoak en 2018 et 2019.

## CHAPITRE 1

# OCCURRENCE OF A MIGRATORY CONTINGENT OF ESTUARY GROWTH ATLANTIC SALMON (*SALMO SALAR*) IN UNGAVA BAY (NUNAVIK, QC) REVEALED BY SCALE MORPHOMETRICS AND OTOLITH CHEMISTRY

### *Introduction*

Numerous studies have investigated the diversity of life histories in salmonids populations (Dodson *et al.* 2013; Mangel et Satterthwaite 2015; Dennert *et al.* 2016; Elias *et al.* 2018; Nevoux *et al.* 2019). Far from being dichotomous, migratory patterns can take different forms within a same species or even within a same population (Dodson *et al.* 2013; Bond *et al.* 2015; Austin *et al.* 2019; Ciepiela et Walters 2019). These migrations may vary in term of frequency, range, and timespan, from freshwater residency to marine anadromy (Quinn et Myers 2004; Lucas *et al.* 2008; Secor 2015). Despite easy access to marine water, some sympatric contingents present large life history variations of facultatively anadromous and partial migration behaviours, whose occurrence may vary in time (Vélez-Espino *et al.* 2013; Austin *et al.* 2019; Kelson *et al.* 2020). This phenomenon has been notably described in Bull Trout (*Salvelinus confluentus*) (Austin *et al.* 2019), Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) (Kelson *et al.* 2020), Dolly Varden (*Salvelinus malma malma*) (Morrison *et al.* 2021) and Arctic Char (*Salvelinus alpinus*) (Spares *et al.* 2015; Arnold 2021), for example. Acknowledging these life history variations is important for conservation and sustainable fisheries management, particularly in the context of climate change (Austin *et al.* 2019; Kelson *et al.* 2020; Koed *et al.* 2020).

Previous studies have provided some important insights into the life history diversity of Atlantic Salmon in the northern Quebec's Ungava Bay (Power 1969; Robitaille *et al.* 1986) (see Appendix 1 for detailed map of salmon river's watersheds in Ungava Bay). At the northernmost limit of the species distribution range in North America, climatic and hydrological conditions are harsh (Way *et al.* 2017; Boisson et Allard 2020; Mohammadian *et al.* 2021); ice cover usually takes place from November to end of May in the Koksoak river estuary (Power 1969). Time window for salmon migration is therefore particularly shorter than in southern rivers. Scale-reading surveys and tagging experiments conducted in the '80s assessed that the Koksoak River supports a sympatric population of sea growth salmons, freshwater growth salmons and atypical estuary growth salmons (Robitaille *et al.* 1986; Power *et al.* 1987). These particular anadromous salmons seem to never migrate beyond the estuary. Based on local knowledge, Robitaille *et al.* (1986) found that this contingent spends summers in estuary and winters in freshwater. For each year in the Koksoak system, these estuary growth salmons are about 12 cm smaller than their sea growth counterparts (Robitaille *et al.* 1986). A fourth contingent called "mixed growth" salmon leave the Koksoak estuary one year after smolting and spend the rest of their pre-reproductive life at sea before entering river (Robitaille *et al.* 1986).

To our knowledge, no study has mentioned this unique estuary growth migratory pattern in other Atlantic Salmon populations worldwide, even if few studies has mentioned other atypical behaviours, notably in northern regions. For example, Orell *et al.* (2018) presented a new phenomenon where small-sized salmon from hatchery releases returns to freshwater only a few months after smolting in the northern Baltic Sea. Some others salmons from the Ponoï River (Koa Peninsula, Russia) do not spawn in the year they arrive, but

instead overwinter and oversummer in freshwater in order to spawn the next fall (Whoriskey *et al.* 2000).

Teleost fish calcified structures such as scales and otoliths provide a detailed source of archival information about their individual life history (Panfili *et al.* 2002; ICES 2011). Annual growth and migrations between different bodies of water can be inferred by changes in patterns of circuli depositions (Ombredane et Bagliniere 1992; Panfili *et al.* 2002). Monitoring surveys based on this morphometric scale-reading method for Atlantic Salmon (*Salmo salar*) populations has relied primarily on inferences from the well-known typical sea growth anadromous contingent (ICES 2011), which usually spend one or many years at sea after their smoltification before coming back in their natal river to spawn (Scott et Crossman 1974).

Nowadays, trace elements measurements can also be used as migratory pattern trackers when coupled with time-dependent trace element deposition records in calcified structures such as otoliths (Campana 1999; Panfili *et al.* 2002; Hüsey *et al.* 2021). Based on prior knowledge of the species' ecology, it can provide new insights on life history variations. However, the use of otolith chemistry as the principal approach of Atlantic Salmon population's monitoring is not wished in a larger and longer context because of the lethal outcome linked to otolith sampling. Moreover, otolith chemistry is more expensive and time-consuming than scalimetry.

The diversity of migration patterns in the Ungava Bay deserves more research attention, *a fortiori* in the present context of fisheries management and the projected impacts of climate changes on northern fish populations (Fleming 1998; Lynch *et al.* 2016; Forseth

*et al.* 2017; Soto *et al.* 2018; Barry *et al.* 2020). Especially when considering the global precarious status of Atlantic Salmon across its distribution range (COSEPAC 2010; Chaput 2012). The confirmation of the scale reading accuracy is therefore always encouraged before further studies on temporal and spatial populations monitoring (Thomas *et al.* 2019; Merg *et al.* 2020).

This study is part of an overall effort by *Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs* (MFFP) from the Province of Quebec to increase knowledge of Atlantic salmon migration patterns to ensure sustainable management of local stocks in Nunavik. The objective of this paper is to confirm and estimate the occurrence of Atlantic Salmon making atypical estuarine migrations in the Koksoak River. To achieve this objective, we corroborate the information obtained by scale morphology—also known as scale reading or scalimetry—with those obtained by otolith chemistry. The particular migratory behavior of estuary growth salmon in the Koksoak River offer a great opportunity to test the concordance of scale morphometrics and the newly developed otolith chemistry interpretation. First, otolith chemical oscillation patterns of some specific trace elements were correlated to acknowledge any patterns. A method was then developed to accurately reveal smoltification threshold, age, migrations between freshwater, brackish water and marine environments and inherent life history contingents of individual salmons, particularly estuary-growth salmon. Secondly, it was tested whether age and migration contingent inferred by annuli from scales of individual salmons corresponded to similar chemical changes in their otoliths.

Finally, we measure the proportion of estuarine migration pattern by scalimetry with a sample of 167 salmons collected from the Koksoak River in 2018 and 2019, supporting the persistence and the high occurrence of estuary growth salmon in the system.

## Materials and methods

### Sample collection

The sample for this study consisted of a total of 86 Atlantic Salmons from 14 populations across the province of Quebec (Figure 3). In order to present a general diversity of migration patterns, they were captured along a wide latitudinal gradient across the specie's range in the Province of Quebec.

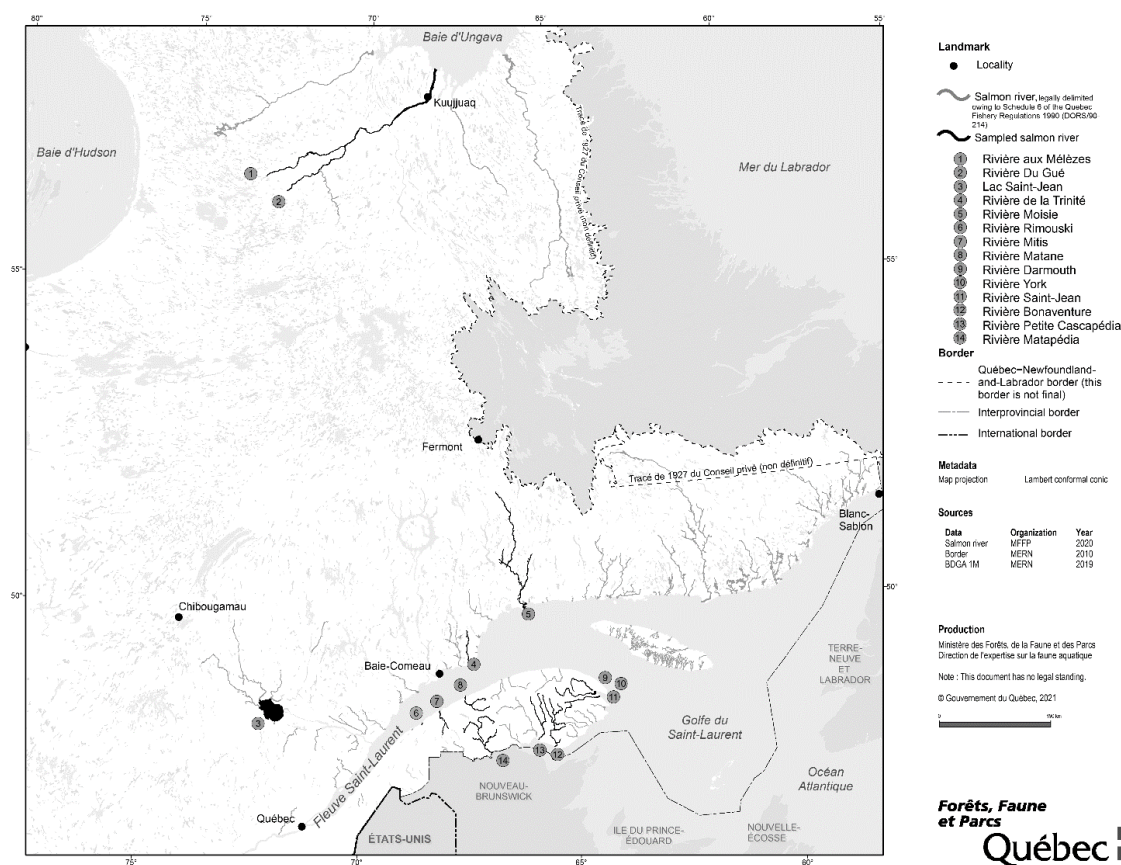


Figure 3 Sampled salmon rivers through the Province of Quebec © Government of Québec



Sixty-five of these fish were collected in 2020 from well-known populations through angling activities, native subsistence fisheries and fish counting facilities with the help of *Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs* (MFFP) and numerous Atlantic Salmon anglers (Table 1). For each salmon, fork length was measured and scale samples were removed just above the lateral line, from the left area slightly posterior to the dorsal fin (ICES 2011). The whole head was also sampled and kept in a freezer for otolith extractions in the laboratory before chemistry analysis.

Koksoak Atlantic Salmon come from fish counting facilities conducted by MFFP in 2018 and 2019. For those two years, a counting fence was operated in August and September on two of the principal tributaries of the Koksoak River, both approximately 400 km upstream from the mouth (Power 1969) : Aux Mélèzes River in 2018 and Du Gué River in 2019 (Appendix 1). A total of 167 Atlantic Salmon were counted at these fences, each were measured (fork length). According to the method described below, scalimetry was performed on all these salmons. Twenty-one of those salmons were sacrificed to perform otolith extraction and chemical analyses.

Table 1 Sampling type (administrative regions of Province of Quebec), dates, sample size and mean fork length [min,max] of Atlantic Salmon studied by otolith chemistry by region and body of water

Region	Body of water	Gear	Year	Dates	N	Mean fork length (cm) and [range]
Bas-St-Laurent	Matapédia River	A	2020	04 Aug	1	82
	Mitis River	A	2020	27 Aug - 27 Aug	2	59 [ 58 , 60 ]
	Rimouski River	A	2020	18 Jun	1	53
Côte-Nord	Moisie River	A	2020	29 Jun - 29 Jun	3	80 [ 76 , 86 ]
	Trinité River	A; F	2020	26 Jun - 11 Aug	13	57 [ 49 , 79 ]
Gaspésie	Bonaventure River	A	2020	21 Jun - 23 Jun	2	59 [ 57 , 60 ]
	Dartmouth River	A	2020	06 Jul - 20 Aug	2	66 [ 55 , 77 ]
	Matane River	A	2020	05 Jul - 08 Sep	4	56 [ 54 , 58 ]
	Petite Cascapédia River	A	2020	01 Aug	1	54
	Saint-Jean River	A	2020	22 Jun - 28 Jun	2	53 [ 53 , 53 ]
Nord-du-Québec (Nunavik)	York River	A; N	2020	19 Jun - 17 Aug	21	70 [ 53 , 100 ]
	Aux Mélézes River (part of Koksoak River)	A; F	2018	02 Aug - 15 Sep	10	63 [ 22 , 83 ]
	Du Gué River (part of Koksoak River)	F	2019	10 Aug - 20 Aug	11	64 ± 6 [ 57 , 81 ]
Saguenay-Lac-Saint-Jean	Lac Saint-Jean	A	2020	27 May - 25 Jul	13	45 ± 11 [ 22 , 56 ]

<sup>1</sup> Angling (A), fish counting facility (F) or native subsistence fisheries with gillnets(N)

## Scalimetry

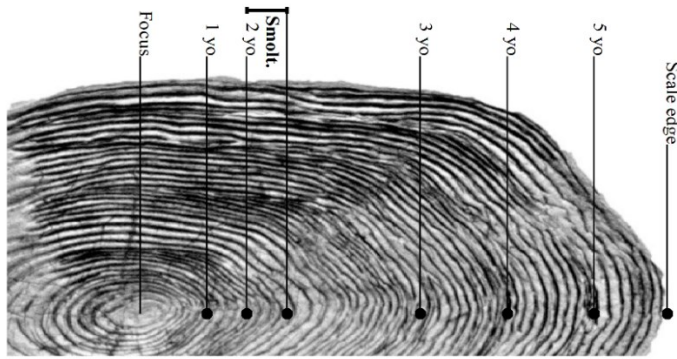
Scales were mounted (Appendix 2) then scale reading was performed for every salmon using a standard method commonly used by wildlife managers to survey Atlantic Salmon's populations (Côté *et al.* 1984; Rouleau and Bisailon 1991; ICES 2011). However, scalimetry was particularly complex for atypical growth patterns of Koksoak Atlantic Salmons. The method relied on Nunavik Research Centre and MFFP expertise on this matter (described below). In the laboratory, multiple scales (Haraldstad *et al.* 2016) were read at least two times by different readers for each specimen. When the two readings did not match, a third reading was performed to resolve differences.

Smoltification zone was located on the scale transect as the first downstream migration of juvenile salmon (Figure 4). Smoltification zone appeared as a change in circuli accretion rate and size (ICES 2011; Todd *et al.* 2014). The outer edge of the scale corresponds to the moment of capture (Peyronnet *et al.* 2007; ICES 2011; Todd *et al.* 2020). Age at smoltification correspond to the number of years a salmon has spent in freshwater prior to smolting (ICES 2011). When present, anterior spawning marks were also noted. They appear as irregular, broken circuli with larger irregular gaps between circuli (ICES 2011). The erosion of complete winter bands may happen as a result of scale reabsorption when the fish is in freshwater (ICES 2011; Kacem *et al.* 2013). It is probably caused by the highly energetic cost of upstream migration coupled with spawning effort. For this reason, the number of subsequent years after the first spawning mark could not have been counted with precision on the scale without an important bias of information lost (Robitaille *et al.* 1986; ICES 2011). Post-smoltification age (i.e. number of years after smoltification) were read from scales as

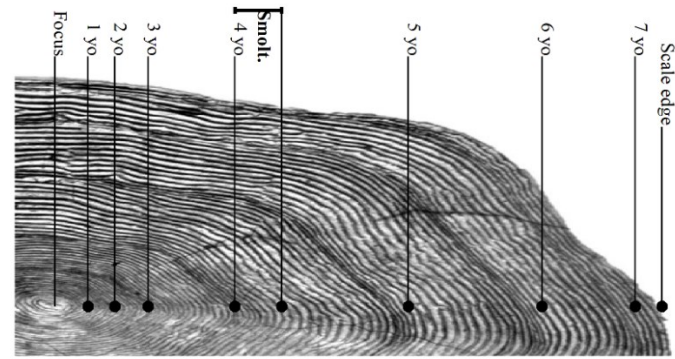
the number of winter bands laid down in its post-smoltification zone until the salmon's first spawning mark (Robitaille *et al.* 1986; ICES 2011; Todd *et al.* 2014).

Migratory contingent was determined for every specimen on their scales based on their post-smoltification years before their first spawning mark for multispawners (Robitaille *et al.* 1986). Typically, sea growth salmon presented wide post-smolt annuli ( $>0.24$  mm) attesting of particularly fast growth during years at sea (Robitaille *et al.* 1984a; Robitaille *et al.* 1986) (Figure 4C). Estuary growth salmon presented relatively more compacted annuli ( $<0.24$  mm) (Figure 4B). These has been shown to be formed on the scales of fish spending the winter in freshwater, where growth ceases (Robitaille *et al.* 1986). Mixed growth salmon presented these two types of annuli in their post-smoltification phase before their first reproduction (Figure 4D). Freshwater growth salmon were discriminated when instead of a clear smoltification zone, annual cycles seem conformed to the same configuration of thin winter bands (Figure 4A). In all cases, we were aware of the potential presence of false checks, whose may be caused by variation in oxygen levels and starvation (Ottaway et Simkiss 1977; ICES 2011; Todd *et al.* 2014; Todd *et al.* 2020).

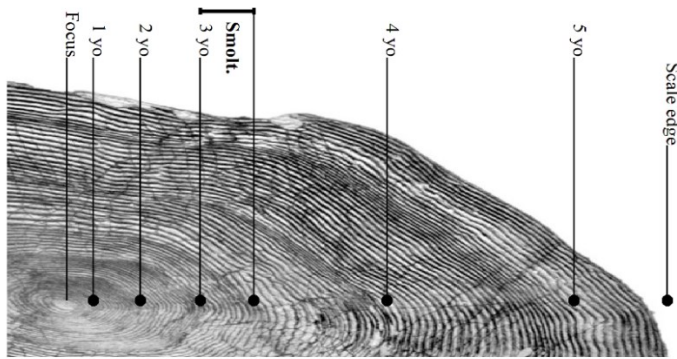
A Freshwater growth salmon's scale



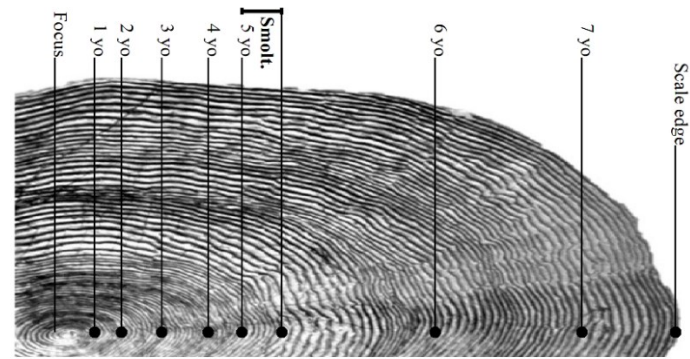
B Estuary growth salmon's scale



C Sea growth salmon's scale



D Mixed growth salmon's scale



© Caroline Brûlé

Figure 4 Scale reading method applied to (A) freshwater growth (male, 104 g, 220 mm, 14-09-2018) (B) estuary growth (female, 2050 g, 593 mm, 16-08-2019) (C) sea growth (female, 2602 g, 672 mm, 15-09-2018) and (D) mixed growth (estuary-sea, female, 2720 g, 643 mm, 17-08-2019) Atlantic Salmon scales captured in the Koksoak River, Nunavik, Qc. For each specimen, focus of the scale is designated, as well as edge of the scale, annuli counts and smoltification zone (“Smolt.”).

## Otolith preparation and chemistry analysis

Sagittae otolith were extracted for each individual fish. Otoliths preparation were completed by following the *Chaire de recherche sur les espèces aquatiques exploitées* (CREAE) standardised protocol (e.g. Morissette *et al.* 2021). Briefly, the right otoliths were cleaned then embedded in two-part epoxy resin (Miapoxy 100, Miapoxy, OH, United States) before being sectioned (0.6 mm thick section) on the transversal plane with a low-speed diamond bladed saw (Isomet was, Buehler, Illinois, United States). These otolith sections were polished to expose core and macrostructure, then mounted on a petrographic slide for microscopy. The LA-ICP-MS analyses were undertaken using a Resonetic Excimer 193 nm ArF laser coupled to an Agilent model 7900 ICP-MS (Agilent, Mississauga, Ontario, Canada) located in LabMaTer laboratory (Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, Canada). Laser ablation was realized in transect mode along the entire otolith axis from the dorsal margin to the ventral margin passing through the otolith core. The laser beam diameter was set to 44  $\mu\text{m}$ , moving at a speed of 5  $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , at a frequency of 25 Hz and a laser fluence of 5  $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ . A panel of 40 elements isotopes, representing routine otolith analyses in LabMaTer, were targeted ( $^7\text{Li}$ ,  $^{11}\text{B}$ ,  $^{23}\text{Na}$ ,  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{25}\text{Mg}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{29}\text{Si}$ ,  $^{31}\text{P}$ ,  $^{34}\text{S}$ ,  $^{39}\text{K}$ ,  $^{42}\text{Ca}$ ,  $^{43}\text{Ca}$ ,  $^{44}\text{Ca}$ ,  $^{55}\text{Mn}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{57}\text{Fe}$ ,  $^{59}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Ni}$ ,  $^{61}\text{Ni}$ ,  $^{63}\text{Cu}$ ,  $^{64}\text{Zn}$ ,  $^{65}\text{Cu}$ ,  $^{66}\text{Zn}$ ,  $^{69}\text{Ga}$ ,  $^{75}\text{As}$ ,  $^{79}\text{Br}$ ,  $^{85}\text{Rb}$ ,  $^{86}\text{Sr}$ ,  $^{87}\text{Sr}$ ,  $^{88}\text{Sr}$ ,  $^{111}\text{Cd}$ ,  $^{114}\text{Cd}$ ,  $^{118}\text{Sn}$ ,  $^{119}\text{Sn}$ ,  $^{120}\text{Sn}$ ,  $^{136}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Ba}$ ,  $^{138}\text{Ba}$ ,  $^{202}\text{Hg}$  and  $^{208}\text{Pb}$ ) for quantification. Each analysis was normalized to an expected calcium content ( $^{44}\text{Ca}$ ) in otolith matrix (40.72 % wt.) (Campana 1999), therefore other sampled elements were related to this value and reported in ppm. A NIST-610 glass reference material was measured to estimate element concentrations and correct for any analytical drift. Additional reference materials USGS MACS-3 and GP-4 (Jochum *et al.* 2005) were also measured for quality control.

Element concentrations from ICP-MS signal were estimated using Iolite 2.5 (Paton *et al.* 2011), a free add-on in Igor Pro software (Wavemetrics Inc, Portland, Oregon, United States). Data integration was performed using the trace elements IS procedure in Iolite. To assess the validity of observed concentrations, elements limit of detection (LOD) was calculated as three times the standard deviation of the gas blank ( $SD_{\text{blank}}$ ) divided by the sensitivity of the signal. Similar to previous studies focusing on fish's otolith chemistry to track migratory patterns (Halden *et al.* 2000; Martin *et al.* 2013; Campbell *et al.* 2015; Loewen *et al.* 2016; Austin *et al.* 2019; Hüsey *et al.* 2021; Morissette *et al.* 2021), four trace elements ( $^{88}\text{Sr}$ ,  $^{64}\text{Zn}$ ,  $^{138}\text{Ba}$  and  $^{24}\text{Mg}$ ) were selected for subsequent analysis. they will be named from now without the number for simplicity.

Laser ablations were initiated from a point before the dorsal margin of the otoliths and ended at a point beyond the ventral margin. The dorsal regions were used for further analysis (Wells *et al.* 2003; Volk *et al.* 2010). For all specimens, we assumed that margin elemental fingerprints represent the elemental fingerprint of the sampling site in freshwater (Morissette *et al.* 2021).

#### Otolith chemistry data analysis

Simultaneous oscillations of  $^{88}\text{Sr}$ ,  $^{64}\text{Zn}$ ,  $^{138}\text{Ba}$  and  $^{24}\text{Mg}$  through the dorsal transverse section of the otolith from core to edge were used to assess age, smoltification, migrations and contingent of salmon. All figures and statistical analyses were realized using the R statistical software version 2021.09.0-351 (R Core Team 2021). Life history of each salmon has then been inferred by oscillations in the chemical distributions along the path of their otolith laser ablation (Campana 1999; Jones *et al.* 2014; Hüsey *et al.* 2021).

Data of each contingent were pooled together, then plotted as mean concentrations from the core ( $\pm$  standard error) to present average transect tendencies. In this analysis, individual Sr, Ba, Mg and Zn values were rounded and averaged by classes of 10  $\mu\text{m}$  distance from core to limit data noise.

Depressions in Zn oscillations were used to count age of every fish analysed (Halden *et al.* 2000; Irina *et al.* 2019; Hüseyin *et al.* 2021). Simultaneous drop in Mg concentration helped to locate the annuli when Zn oscillations were not obvious (Hüseyin *et al.* 2021). Ba and Sr oscillations were useful for reconstructing salinity histories of migratory fish (Bath *et al.* 2000; Elsdon et Gillanders 2006; Morissette *et al.* 2016; Walsh et Gillanders 2018; Roloson *et al.* 2020; Albertsen *et al.* 2021). Therefore, migration trajectories between different bodies of water –freshwater, brackish water, and saltwater - were discriminated using threshold concentrations values in Sr and Ba transects (Table 2). When the Sr concentration was over 1500 ppm and the Ba concentration was under 0.5 ppm simultaneously, it was inferred that the fish was in saltwater. When the Sr concentration was over 1500 ppm and the Ba concentration was between 0.5 ppm and 2 ppm simultaneously, it was inferred that the fish was in brackish water. When  $\text{Sr} < 1500$  ppm and/or  $\text{Ba} > 0,5$  ppm, it was in freshwater. A sudden increase in Sr distribution coupled with a simultaneous drop in Ba distribution indicated the salmon's first downward migration from its natal river to a more downstream habitat, as well as its inherent smoltification (Bath *et al.* 2000; Elsdon et Gillanders 2006; Ramsay *et al.* 2011; Walsh et Gillanders 2018; Roloson *et al.* 2020; Albertsen *et al.* 2021; Morissette et Sirois 2021). The beginning of the smoltification period was established at the last annuli – therefore at the minimum concentration of the last  $^{64}\text{Zn}$  drop before the identified smoltification zone. The end of the smoltification period was



established at the maximal Sr concentration of this sudden increase. Salmon's contingent (sea growth, estuary growth, mixed growth or freshwater growth) was discriminated based on their migrations during their post-smoltification years before the first reproduction.

Table 2 General criteria assessing life history stages onto chemical otolith transect

Life history stages	Microchemical criteria assessing distance from the core of each life history stages
Each growth year (annuli)	Lowest [ <sup>64</sup> Zn] of each oscillation, usually coupled with a simultaneous [ <sup>24</sup> Mg] decrease
End of juvenile growth/ beginning of smoltification period	Lowest [ <sup>64</sup> Zn] of the last pre-smoltification year
Smoltification	Marked uprise of [ <sup>88</sup> Sr] coupled with a decrease of [ <sup>138</sup> Ba]
End of smoltification zone	Highest value of the marked rise of [ <sup>88</sup> Sr]
Presence in seawater	[ <sup>88</sup> Sr] >1500 ppm and [ <sup>138</sup> Ba] < 0.5 ppm
Presence in brackish water	[ <sup>88</sup> Sr] >1500 ppm and 0.5 ppm ≤ [ <sup>138</sup> Ba] < 2 ppm
Presence in freshwater	Other [ <sup>88</sup> Sr] and [ <sup>138</sup> Ba]
Edge	Period between the last annulus and the outer edge of the scale or the otolith, which represent the moment of capture
Freshwater growth contingent	Virgin post-smoltification years spent only in freshwater
Sea growth contingent	Virgin post-smoltification years spent in saltwater, even during winter
Estuary growth contingent	Virgin post-smoltification years spent in brackish water during summer coupled with winter migrations in freshwater
Mixed growth contingent	At least one post-smoltification winter in downstream freshwater as well as at least one winter spent at sea

## Correspondence between scale-reading and otolith chemistry methods

Age at smoltification and number of years post-smoltification were assessed using both scale-reading and otolith-chemistry methods for scale-identified virgin salmon only. An age bias plot and an age frequency table were plotted for each variable to ensure consistency between methods (Campana *et al.* 1995; Campana 2001; Gallagher *et al.* 2016; Ogle 2016).

The average coefficient of variation (ACV) was used to evaluate the reproducibility of age determination (Chang 1982; Campana *et al.* 1995; Campana 2001; Gallagher *et al.* 2016; Ogle 2016):

$$ACV = 100 \times \frac{\sum_{j=1}^n \frac{S_j}{\bar{x}_j}}{n} \quad (1)$$

Where  $S_j$  is the standard deviation of the age estimates for the  $j^{\text{th}}$  fish. It was obtained by using the *agePrecision()* function from *FSA* package (Ogle *et al.* 2021). ACV below 5% were considered satisfying accuracy between methods (Campana 2001; Gallagher *et al.* 2016).

Migratory contingent of each salmon was also assessed using both scale-reading and otolith-chemistry methods. A contingency table was made, then Cohen's kappa statistic was used to evaluate the percentage of agreement between both methods. The range of this statistic stands between 0 and 1, indicating respectively no consistency or perfect agreement between classification methods (Bilton and Jenkinson 1968; Bilton *et al.* 1983; Ramsay *et al.* 2011).

## *Results*

### Age and life history events revealed by scalimetry

All 52 salmon from southern rivers except for those from Lac Saint-Jean (LSJ) presented typical sea-growth anadromous migrations patterns, both from their scales and otoliths. The 13 salmon from LSJ were associated to the freshwater growth contingent. All these salmon from southern rivers and LSJ didn't present spawning mark and were therefore considered virgin. Two salmon from LSJ were captured before smoltification (i.e., as juvenile), making it impossible to assess their contingent (Appendix 3).

From the 21 salmon sacrificed from the Koksoak River, 11 of them (52%) presented scales corresponding to the estuary growth contingent (an example of the scale reading method is presented in Figure 4). One specimen was a freshwater growth salmon (5%) and seven (33 %) were associated to the typical sea growth contingent. Two specimens (10%) appeared to be mixed growth salmon. Two specimens from the estuary growth contingent of the Koksoak River presented previous spawning marks (e.g. Figure 5A).

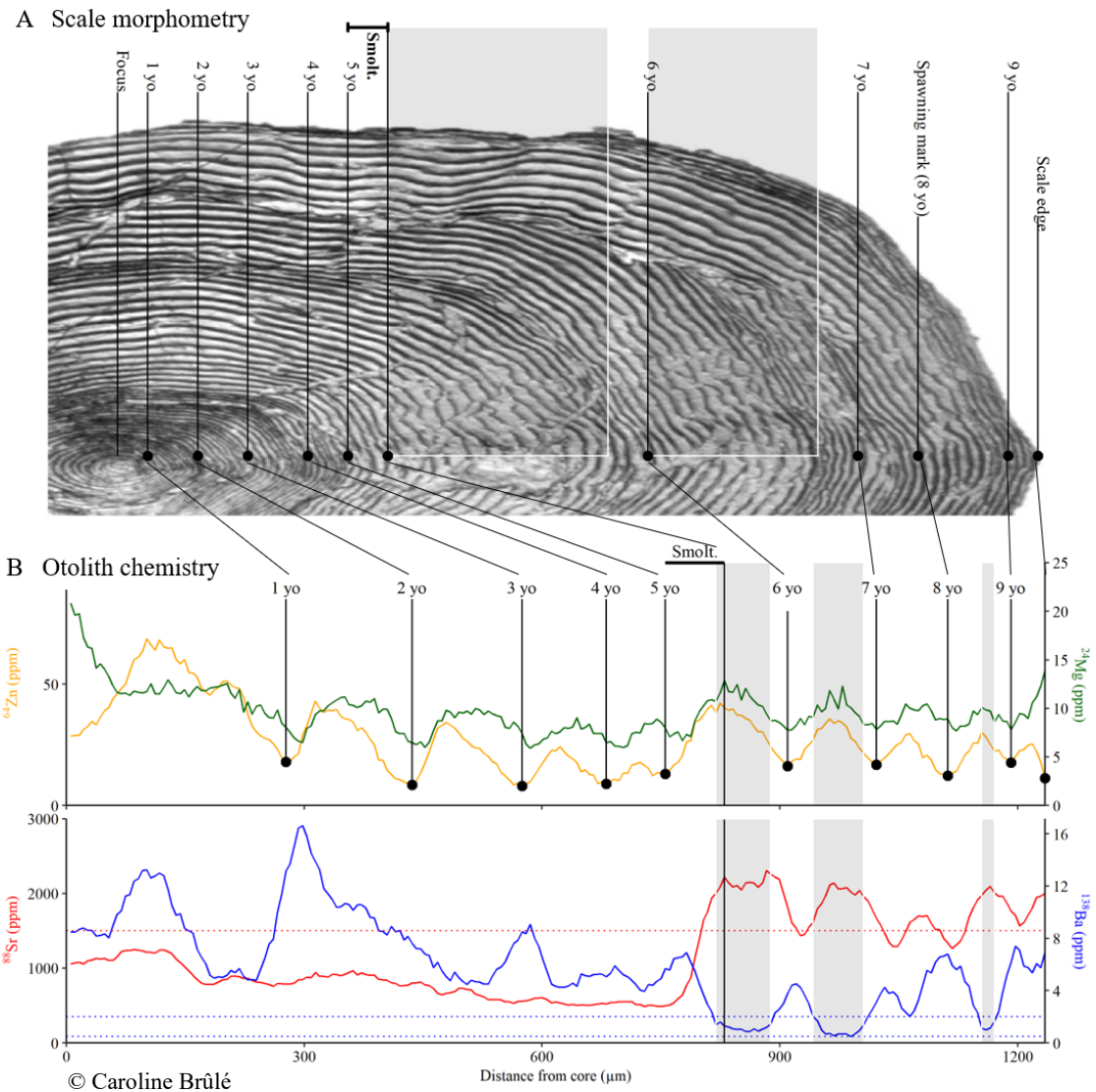


Figure 5 Scale reading morphometry (A) and otolith chemistry transect (B) of an estuary growth salmon which exhibits a previous spawning mark on its scales. The smoltification zone (“Smolt.”) is located on both structures. The specimen was captured in the Du Gué River (Koksoak River, Nunavik, QC) on August 17, 2019, in a fish counting fence (Male, 633 mm, 2534 g). Light grey zones mark the regions of the profile selected as data corresponding to brackish water.

Age and life history events revealed by otolith chemistry method

Changes of Zn and Mg concentrations in otolith chemistry were observed for all specimens because of annual variations (Figure 6). Across all specimens, the mean  $\pm$  SE [CI 95 %] of 1 year-old mark appeared at  $316 \mu\text{m} \pm 70 \mu\text{m}$  [117-527  $\mu\text{m}$ ] from the core of their respective otolith transect (

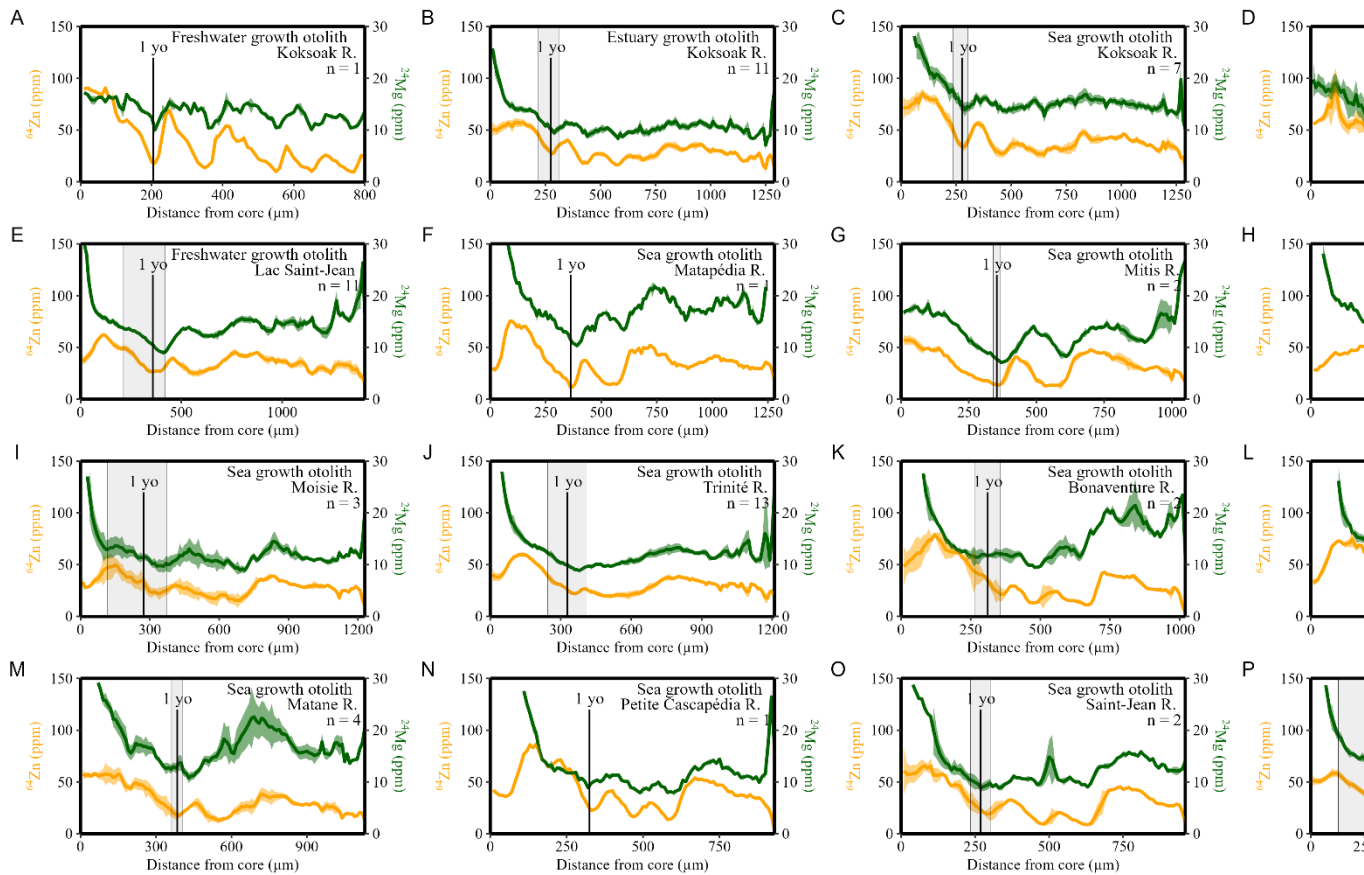


Figure 7). Changes in otolith chemistry caused by smoltification and migrations were also element specific. Simultaneous variations in Ba and Sr concentrations appear to occur in similar concentrations from the otolith's core for all fish within the same migratory contingent-river group (Figure 8).

This smoltification chemical mark was even distinguishable in freshwater growth salmon otolith (Figure 8A and E) within smaller concentration's variations. The only one freshwater growth salmon sampled from the Koksoak River presented a relatively constant Sr concentration along its otolith transect, around 1000 ppm (Figure 6A). This concentration was under the 1500 ppm threshold value used to discriminate anadromous salmons. Similarly, Ba concentration transect of these freshwater growth salmons was always above the threshold values of 0.5 ppm and 2 ppm used to discriminate seawater and brackish water.

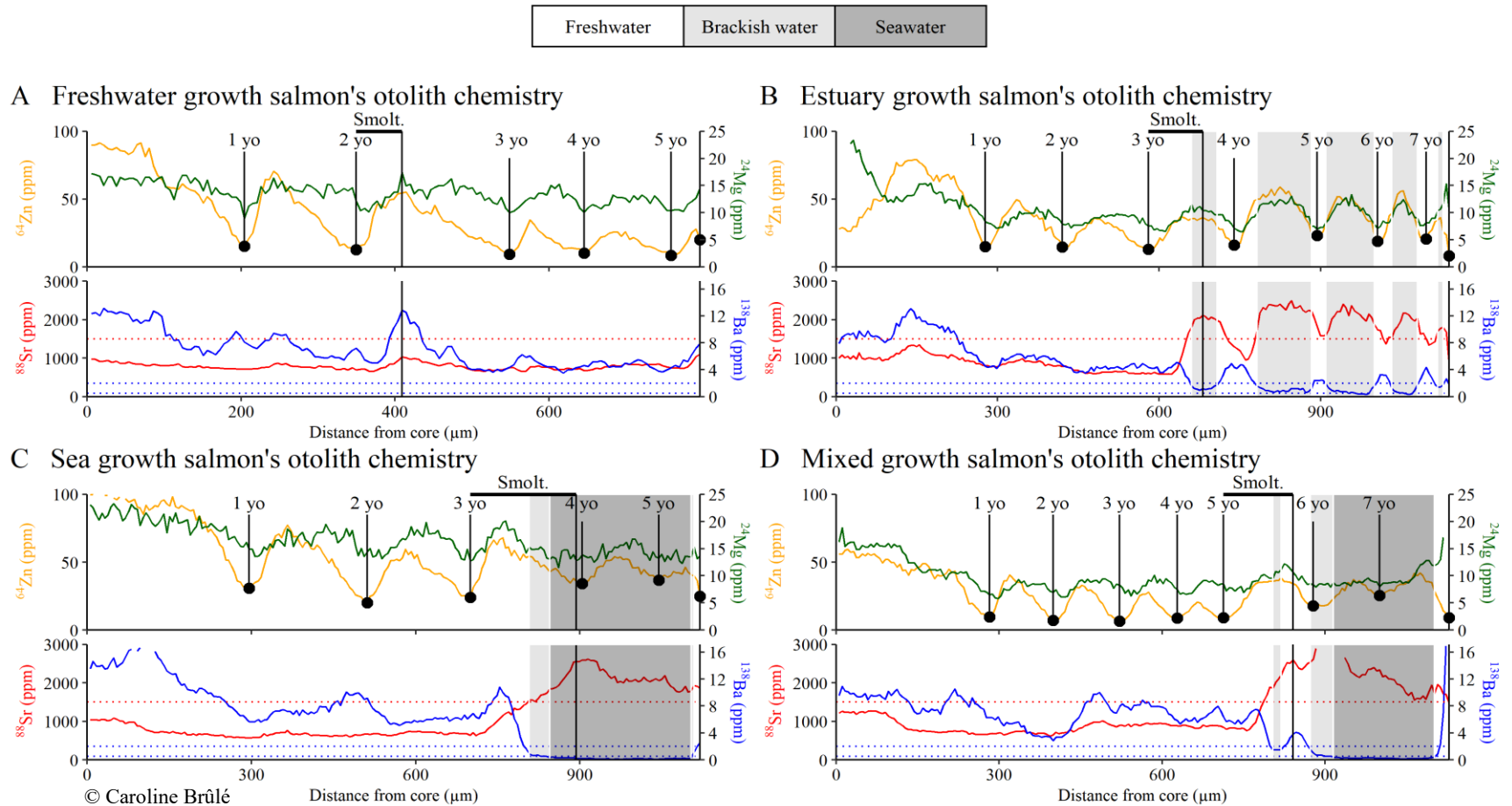
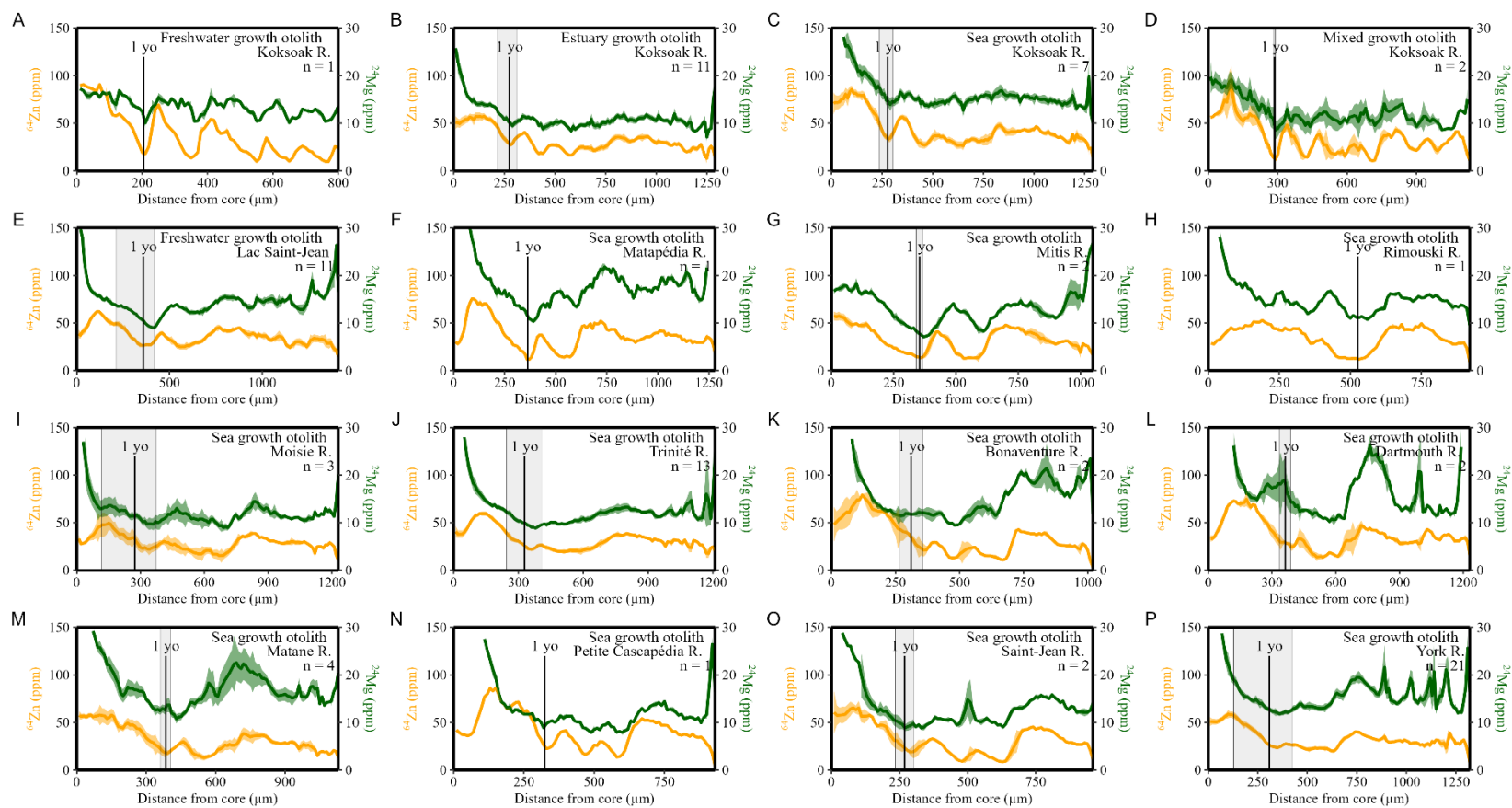


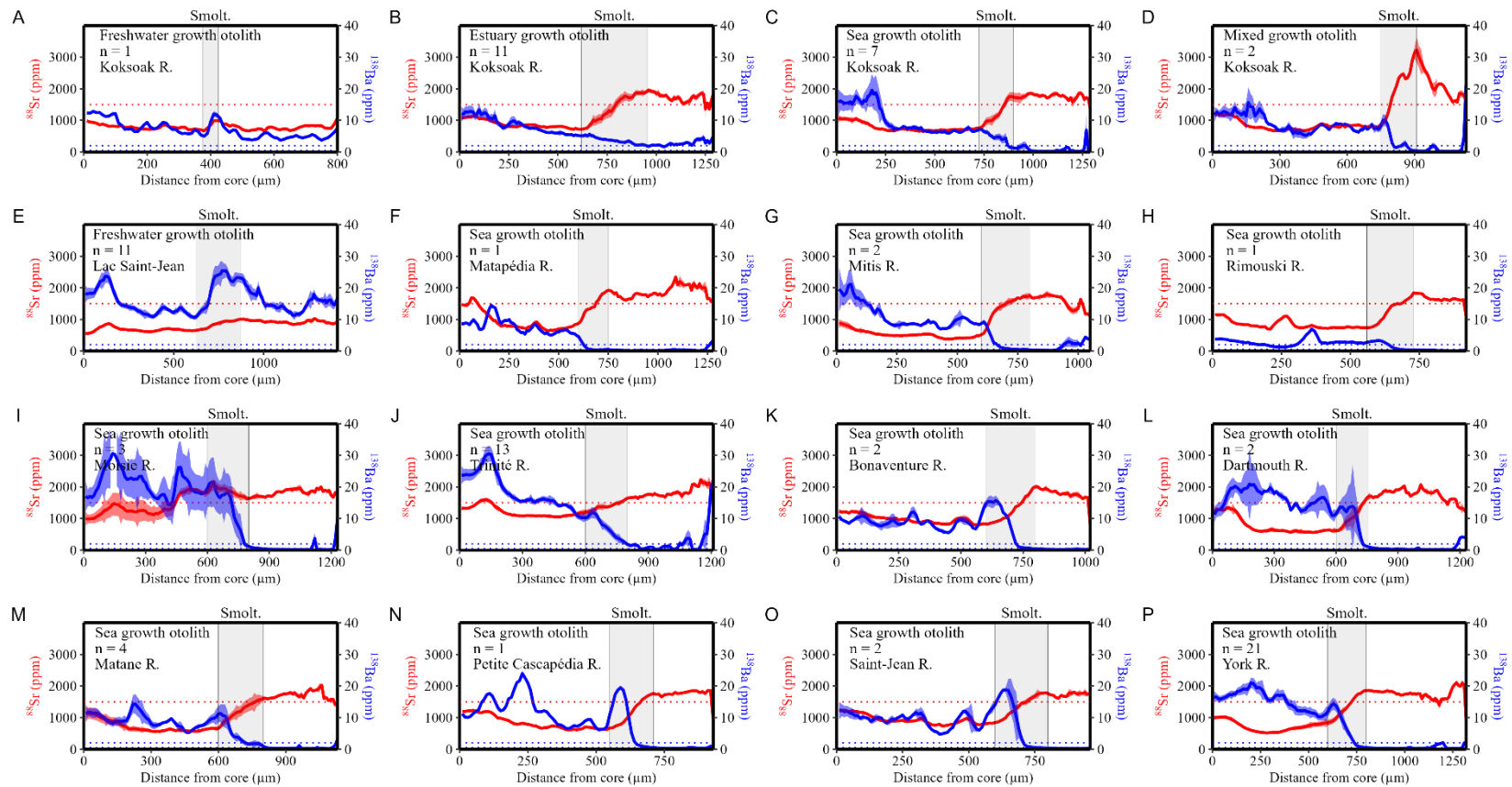
Figure 6 Elemental profile of (A) fresh-water growth (Male, 104 g, 220 mm, 14-09-2018) (B) estuary growth (female, 2050 g, 593 mm, 16-08-2019) (C) sea growth (female, 2602 g, 672 mm, 15-09-2018) and (D) mixed growth (estuary-sea, female, 2720 g, 643 mm, 17-08-2019) Atlantic Salmon otolith captured in the Koksoak River, Nunavik, QC. For each specimen, core section of the transect is designated, as well as annuli counts and smoltification zone (“Smolt.”). Light grey and dark grey zones mark the regions of the profile selected as data corresponding to brackish water and seawater growth, respectively. They correspond to the same specimen as figure 3. Dotted lines represent threshold concentrations. The 95% confidence interval are presented with lower and upper bounds around the mean.





© Caroline Brûlé

Figure 7 Localisation of the mean 1-year-old annuli on  $^{64}\text{Zn}$  and  $^{24}\text{Mg}$  otolith isotopic profiles ( $\pm$  SE) of northern salmon captured in the Koksoak River (A; B, C, D), freshwater growth salmon from Lac Saint-Jean (E) and southern sea growth salmon captured in southern Quebec rivers (F; G; H; I; J; K; L; M; N; O; P). The minimum and maximum of the 1-year-old mark from each group correspond to both side of the grey rectangle. X axis are not similar between each rectangle to maximize visualisation. The 95% confidence intervals are presented with lower and upper bounds around the mean.



© Caroline Brûlé

Figure 8 Mean localisation of the smoltification zone on  $^{88}\text{Sr}$  and  $^{138}\text{Ba}$  otolith isotopic profile ( $\pm$  SE) of northern salmon captured in the Koksoak River (A; B, C, D), freshwater growth salmon from Lac Saint-Jean (E) and southern sea growth salmon captured in southern Quebec rivers (F; G; H; I; J; K; L; M; N; O; P). Mean beginning and end of the smoltification zone (“Smolt.”) are defined by vertical black lines. Dotted horizontal lines emphasises threshold values for  $^{88}\text{Sr}$  (1500 ppm) in red, and for  $^{138}\text{Ba}$  (0.5 ppm and 2 ppm) in blue. X axis are not similar between each rectangle to maximize visualisation. The 95% confidence intervals are presented with lower and upper bounds around the mean.

From the 21 sacrificed salmon captured in the Koksoak River, 11 (52%) of them had spent some time in brackish water after smoltification, but apparently never went in seawater (e.g. Figure 5A). By considering both annuli-related (Zn, Mg) and migration-related (Sr, Ba) oscillations simultaneously, it appeared that these salmon spent their post-smoltification summers in brackish water and their winters in freshwater (e.g. Figure 6B). They therefore corresponded to the estuary growth contingent. From the Koksoak River, seven specimens (33 %) were associated to the typical sea growth contingent according to their otolith (Figure 8C). They spent all their post-smoltification years in seawater, then came back in freshwater for spawning (e.g. Figure 6C). Two specimens (10%) appeared to be mixed growth salmon, because they had spent at least one winter in freshwater and one winter in seawater in their post-smoltification years (e.g. Figure 6D).

#### Correspondence between scalimetry and otolith chemistry methods

Contingency assessment based on otolith chemistry for 85 of the 86 fish unambiguously coincided with accretion marks on their respective scales (Table 3). This one misclassified fish was characterised as mixed growth salmon based on their scale, but as sea growth salmon based on its otolith chemical transect. Age at smoltification estimates were consistent between both methods (Figure 9A1 & A2; ACV=4.1%). Both techniques were also reproducible for post-smoltification age of the scale-established virgin salmon (Figure 9B1 & B2, ACV=2.2%).

Table 3 Cross-validation classification of salmon to their migratory contingent based on the otolith chemistry method (e.g. concentrations of Sr, Ba, Mg and Zn in otoliths) and the scale-reading method (e.g. width of their post-smoltification winter annuli on their scales).  $P_{agree}$  represents de percentage of individuals of each scale-determined contingent which were correctly classified to the same otolith-determined contingent. Correctly classified individuals are shown in bold.

Scale reading	Otolith chemistry					$P_{agree}$
	Sea growth	Estuary growth	Freshwater growth	Mixed growth	NA (Smolt)	
Sea growth	<b>58</b>	0	0	0	0	1.00
Estuary growth	0	<b>11</b>	0	0	0	1.00
Freshwater growth	0	0	<b>12</b>	0	0	1.00
Mixed growth	1	0	0	<b>2</b>	0	0.67
NA (Smolt)	0	0	0	0	<b>2</b>	1.00

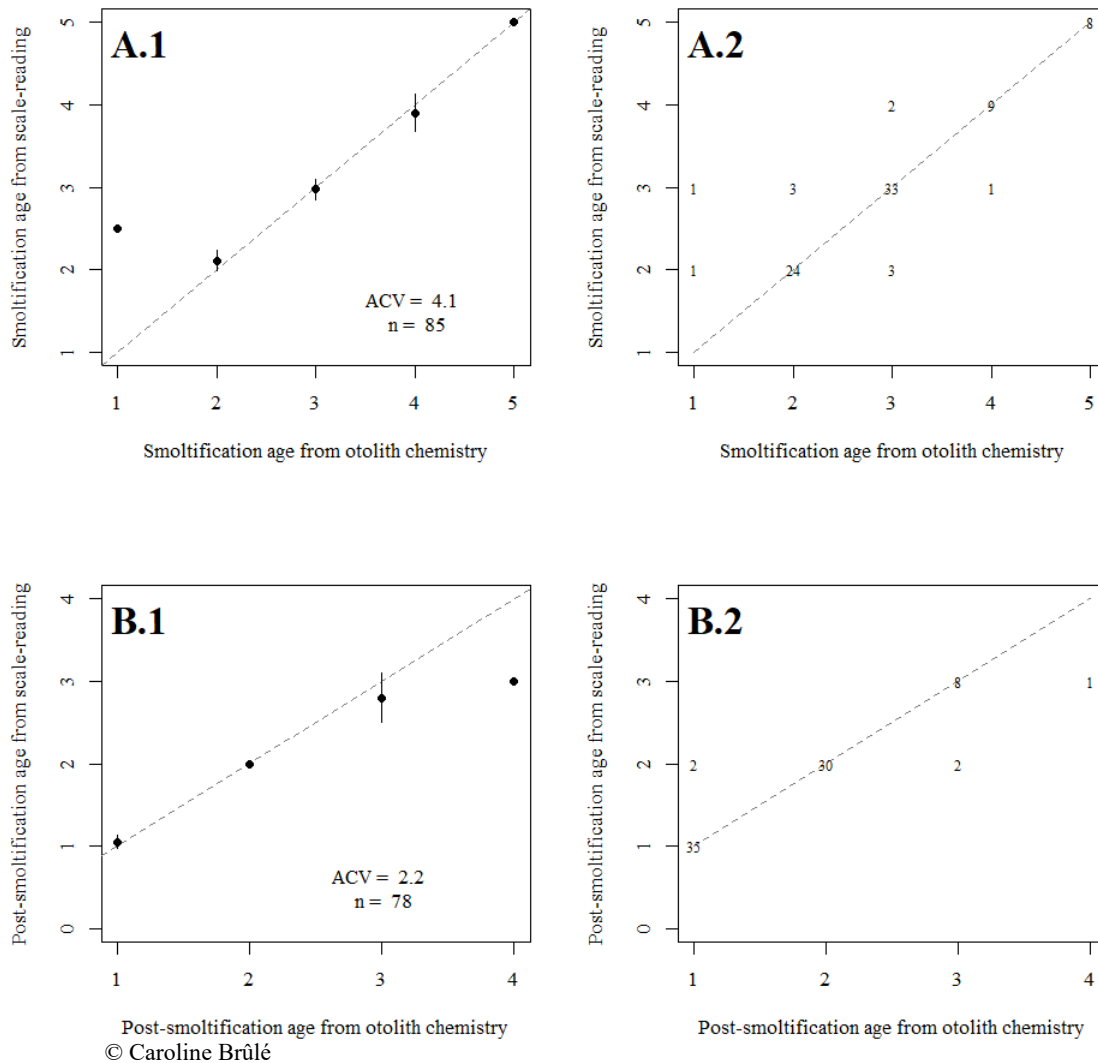


Figure 9 Age bias plots (A.1; B.1), age frequency plots (A.2; B.2) and average coefficient of variation (ACV) between otolith chemistry and scale-reading method for (A) smoltification age for all salmons (B) post-smoltification age for virgin salmons for both age parameters, the ACV did not exceed the 5% level of accuracy (Campana 2001; Ogle 2016). Therefore, scale reading and otolith chemistry methods assess similar results with satisfying precision for these age parameters (Campana 2001; Gallagher *et al.* 2016).

Based on the scale-reading method, only 4 of the sacrificed salmons presented previous spawning mark. There were although not enough specimens to establish spawning mark criteria on otolith chemistry transects. It was noted, however, that an apparent spawning mark on the scales of these estuary-growth salmons coincided with two whole recurrent years spent in freshwater on their otolith transect (e.g. Figure 5 & Appendix 4).

## Migratory contingents in two large Koksoak tributaries during the 2018-2019 spawning runs

Atlantic Salmons captured at Aux Mèlèzes and Du Gué Rivers counting fences in 2018 and 2019 corroborated the diversity of migratory contingent in the Koksoak system. Scalimetry revealed that estuary growth salmons corresponded respectively to 22% and 74% of all captures in 2018 and 2019 (Figure 10). Moreover, 54 of all these 98 estuary-growth salmons over both years (55%) presented previous spawning marks on their scales.

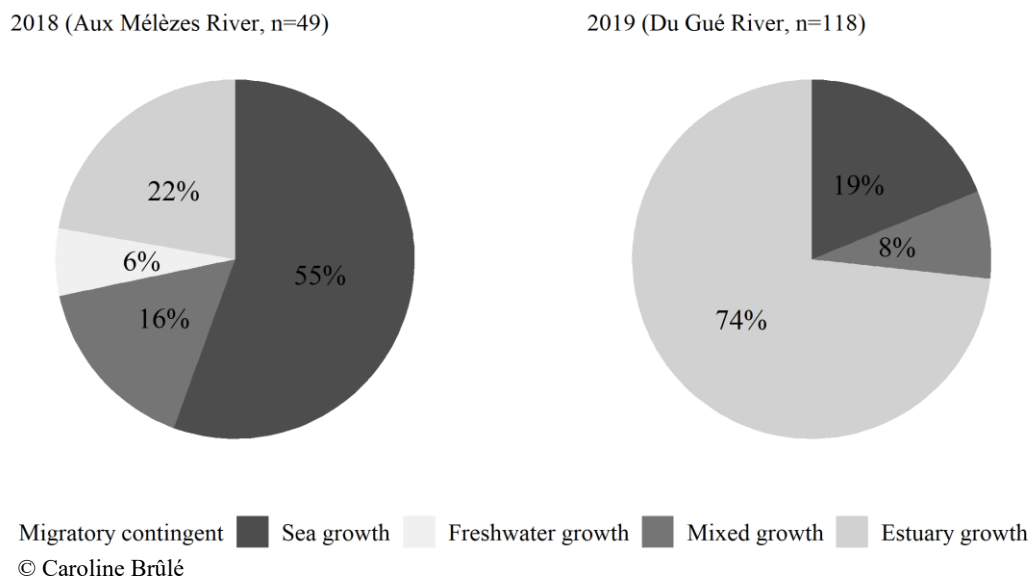


Figure 10 Proportion of each migratory contingent from systematic sampling by fish counting fence in two tributaries of the Koksoak River in 2018 and 2019

### *Discussion*

Otolith chemical analyses and scalimetry methods both corroborate the occurrence of four different Atlantic Salmon migratory contingents in the Koksoak River (Nunavik, QC). This study consolidates the relevance of using scalimetry as the main technique for monitoring Atlantic Salmon populations in a context of sustainable management and conservation, mostly by prioritizing a non-lethal approach. Age and life history events

inferred for each specimen by these two methods strongly matched, consolidating the relevance of using scalimetry as the main technique for monitoring Atlantic Salmon populations in a context of sustainable management and conservation, mostly by prioritizing a non-lethal approach. Furthermore, the novel alternative methodology combining the concentrations of  $^{64}\text{Zn}$ ,  $^{88}\text{Sr}$ ,  $^{24}\text{Mg}$  and  $^{138}\text{Ba}$  in the otoliths proposed in this paper provided more detailed than ever information on individual life history. Finally, this study confirms the occurrence, as well as the persistence, of an atypical estuarine migratory contingent of Atlantic Salmon in the Koksoak River system, as described in previous 80's studies (Robitaille *et al.* 1986).

#### Reliability of scalimetry

As expected, scalimetry stands as an efficient method to assess age and life history events of individual salmon. It presents the main advantage to be at lower cost and less time-consuming than otolithometry (Panfili *et al.* 2002). Scale sampling doesn't imply fish mortality; this alone stands therefore as a major selling point for sustainable management in the context of salmon general decline (Ramsay *et al.* 2011; Mills *et al.* 2013; Soto *et al.* 2018; Dadswell *et al.* 2021). These results lessen doubts expressed by some previous studies (DeCicco *et al.* 2006; Campbell *et al.* 2015) about monitoring salmonids migrations through scalimetry method. For example, the uncoupled results between scale and otolith reported in juvenile Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) of the Columbia River estuary raised concerns on the accuracy of fine-scale resolution scale-reading for tracking the use of saline part of the estuary (Campbell *et al.* 2015). In the present study however, salmon frequent different bodies of water whose environments are contrasted enough to produce scale accretion rate that can be distinguished efficiently by morphometric examination.

In addition to salinity, water temperature and frequent feeding incomes are known to affect circuli deposition on scales (Thomas *et al.* 2019). Winter bands accretion witness major variation on this matter. Sea growth salmon seems to feed continuously all year long while in saltwater, resulting in large winter bands in annuli accretion (Robitaille *et al.* 1986). Freshwater growth and estuary growth salmon, however, both spend winters in freshwater; thin winter bands on their scales may therefore stand as a result of temporarily stunted growth during this time (Robitaille *et al.* 1986). Short-term variations of ambient temperature and resources availability can also result in formation of false checks (Todd *et al.* 2020). These minor anomalies in scale accretion are observable during scalimetry; they may even be confused with annuli by inexperienced readers. Thus, scale reading is a reliable method to assess life history traits in salmonids (Rifflart *et al.* 2006; Závorka *et al.* 2014).

The main limitation of scalimetry reside in the difficulty to infer the complete life history for non-virgin salmon (Côté *et al.* 1984; ICES 2011). The partial scale reabsorption stands as a durable mark of anterior spawning episodes, but it limits the available information by circuli accretion for subsequent events (White and Medcof 1968; Kacem *et al.* 2013). Even if Atlantic Salmons are iteroparous, previously spawned individuals are generally present in lower proportion regarding their entire population (Niemelä *et al.* 2006; Bordeleau *et al.* 2019). The high metabolism cost of marine migration coupled with low survival rate are at least partially responsible for the low return of these repeated spawners (Strøm 2018; Jensen *et al.* 2019; Strøm *et al.* 2019). In northern populations, the problem of scale reabsorption persists; previous studies in the Koksoak River focused mainly on virgin salmon notably for this reason (Robitaille *et al.* 1986). However, this study assessed the persistent occurrence of estuary growth salmon in Koksoak River in recent years, for which



an unusually high proportion of them (55%) have previously spawned. This highlights the need to clarify migration patterns of mature salmon after their first reproduction, all contingents considered, through other methods considering scalimetry isn't conclusive enough on this matter (White et Medcof 1968). Otolith chemistry could be a promising alternative for further research by providing new insights on water salinity.

To assess the reproducibility and comparisons of monitoring techniques, one objective would be to standardize a unique scale-reading method for all Atlantic Salmon populations. At the moment, the method proposed in ICES (2011) is largely used to monitor typical sea growth anadromous salmon. Some local expertise has been developed, however, to track life history events of atypical migration patterns such as freshwater growth salmon in LSJ. This expertise should indeed be included in the generalized scale-reading method to assess similar migration patterns elsewhere. In addition, it should be relevant to consider sample site and date as well as the size of the fish before the first scale-reading, as a proxy of its theoretical lifetime and regional particularities. For example, without this information, it may be difficult to discriminate an estuary growth salmon of Koksoak River from a potamodromous salmon from lac Saint-Jean, as both present a clear smoltification zone and spend their subsequent winters in freshwater (i.e. presenting thin winter marks). Ultimately, the use of a standardized scale-reading method for the monitoring of all salmon populations would be useful to assess the occurrence of typical and atypical migratory contingents through space and time.

### Insight from otolith chemistry

The approach presented in this study combining the concentrations of  $^{64}\text{Zn}$ ,  $^{88}\text{Sr}$ ,  $^{24}\text{Mg}$  and  $^{138}\text{Ba}$  in the otoliths made it possible to efficiently detect age and migrations of individual Atlantic Salmons across all their lifetime. With a larger sample of previous spawners, it would be possible to determine objective scalimetric criteria that would reflect as closely as possible the complete life history, including absolute age, of those previous spawners with which we are currently struggling.

As predicted through scalimetry, all salmons from southern rivers corresponded to a typical anadromous sea growth contingent according to their otolith chemistry (Gallagher *et al.* 2018), as they all spent at least one whole year at sea after their smoltification. Those typical migration patterns between water bodies of different salinities could be inferred from Sr and Ba otolith chemistry oscillations (Elsdon et Gillanders 2005; Gillanders 2005; Walther et Limburg 2012; Bond 2013; Irina *et al.* 2019; Albertsen *et al.* 2021). Similarly, all specimens sampled in Lac Saint-Jean were freshwater growth salmon, also called ouananiche (Fortin *et al.* 2009; Hutchings *et al.* 2019). In fact, on the base of their ecological behaviour, the correct terminology would be “potamodromous salmon”, considering they are in fact freshwater salmons with apparent smoltification and subsequent migratory behaviour (Tanguy *et al.* 1994; Secor 2015; Hutchings *et al.* 2019). Salmons characterised as estuary growth contingent could be inferred using the same technique, as they apparently spent summers in brackish water and winters in freshwater after their smoltification growth.

Threshold values of Sr and Ba used in the present study to discriminate the salinity of water masses cannot be generalized. Even if the specimens were largely distributed across

the province of Quebec, only a few specimens per population were analysed. Threshold values may in fact vary between populations (space) and time, considering environmental conditions of their respective river (Phillis *et al.* 2011). Even though, otolith chemistry patterns have been proven useful to infer life history events with a prior knowledge of possible migrations behavior (Campana 1999).

Simultaneous variations of Ba and Sr which marked the smoltification zone on otolith transects were coherent with literature (Kennedy *et al.* 2002; Ramsay *et al.* 2011; Sturrock *et al.* 2015; Hüsey *et al.* 2020). Those elements are linked to environmental factors, such as salinity, temperature, and pH (Secor *et al.* 1995; Elsdon et Gillanders 2002; Elsdon et Gillanders 2005; Walther et Thorrold 2006; Loewen *et al.* 2016). When mature salmon migrated back upstream in freshwater, Sr concentration did not decrease as low as the values observed during their juvenile stage. This phenomenon is most likely not linked to their feeding habits considering water, not food, contributes the majority of strontium and barium deposited in the otoliths of a marine fish (Walther and Thorrold 2006). Some possible explanations could be a change in their biomineralization rate, which decrease with fish growth (Hüsey *et al.* 2020), or the maturation of their gonads as well.

Otolith zinc oscillations used as a proxy for age count worked efficiently as mentioned in other studies (Halden *et al.* 2000; Loewen *et al.* 2016; Irina *et al.* 2019). This element being linked mostly to circannual hormonally driven variations (Loewen *et al.* 2016), it can be used as a means for age inference. More precisely, the preferred hypotheses for the sources of Zn in the otolith would be diet contribution (Ranaldi and Gagnon 2008) maturation, and concentration in water (Sturrock *et al.* 2015). This contribution from diet would explain why Zn from the diet would be more abundant during growth in the organism

and otolith. Moreover, the maturation of the gonads requires a lot of Zn, which would be diverted from the organism to the gonads. To a lesser extent, Mg appears to improve age estimate on the otolith transect (Limburg *et al.* 2018; Hüsey *et al.* 2021), as this element is not affected by neither temperature nor salinity (Elsdon et Gillanders 2002). Other elements such as P (Hüsey *et al.* 2021), Pb (Søndergaard *et al.* 2015), Cu (Sturrock *et al.* 2012) or Li (Sturrock *et al.* 2012) could potentially be used to infer age, although most of them were below the limit of detection in the present study.

Altogether, otolith chemistry offers more precise information than scale's morphometric relatively to post-smoltification years, mostly because otolith is not affected by reabsorption due to spawning events. On the other hand, it is not possible to detect reproduction episodes in the otolith. A reproduction episode does not lead to a direct elemental oscillation in the otolith (Irgens *et al.* 2020), but would rather most likely be the result of ambient conditions. Based on their scale reabsorption mark, only four specimens of this study had previously spawned, limiting further conclusions on detection of this behaviour in general.

We would encourage to consider similar otolithometry method for further studies on migration diversity of anadromous salmonids. Age and migratory patterns represent only a fraction of otolith chemistry potential applications; ultimately, natal river (Barnett-Johnson *et al.* 2008; Bradbury *et al.* 2008; Morissette et Sirois 2021) and marine feeding area (Dempson *et al.* 2010; Hanson *et al.* 2013; Minke-Martin *et al.* 2015; Almodóvar *et al.* 2020) could even be inferred with this approach. At the end, the simultaneous use of scale and otolith methods appears to be the most complete technique to track age and life history events during the entire life stages of individual Atlantic Salmon.

Our findings provide convincing evidence demonstrating the occurrence as well as the persistence of a migratory contingent of estuary growth salmon in the Ungava Bay region. At the end, there is four sympatric contingents in the Koksoak system: typical sea-growth salmons, estuary-growth salmons, mixed-growth salmons, and freshwater growth. This observation corroborates the evidence that Atlantic Salmon can display a large range of migratory strategies (Cucherousset *et al.* 2005; Loewen *et al.* 2009; Jones *et al.* 2014; Weitkamp *et al.* 2014; Dennert *et al.* 2016; Ciepiela et Walters 2019; Roloson *et al.* 2020). It is unclear if mixed-growth salmons stand as an independent contingent or instead as an intermediate stage on a continuous range of migration diversity.

The causes of this diversity are yet to be established, but behavioral adaptations to the particularly harsh environmental conditions of this river are mostly considered (Robitaille *et al.* 1986). They may accentuate the cost of anadromy, ultimately influencing the individual trade-off decision to migrate (Quinn *et al.* 2016; Jensen *et al.* 2019). Moreover, time windows of opportunity without ice cover are shorter in the North than in the South (Power 1969), limiting the duration of the growing season for salmons and maybe imposing physical barriers that could limit the migration upstream, or downstream. In addition, considering that estuaries are productive marine ecosystems, those could be advantageous for salmons at this latitude, a good adaptation to environmental stochasticity and extreme conditions (Levings 2016). The occurrence of estuary migration, freshwater residency or even precocious male parr (Bouchard *et al.* 2020) as more common behavior in the Koksoak River may be facilitated in these conditions in order to optimize salmon's individual fitness through iteroparity (Bordeleau *et al.* 2019). They may also suggest the high cost of migration due to distance or low benefit relative to remaining close to their natal river (Austin *et al.* 2019).

Incentives for freshwater residency may include relative favorable prey abundance and thermal regimes (Austin *et al.* 2019). For example, in Austin *et al.* (2019) relating facultatively anadromous bull trout (*Salvelinus confluentus*), the main river stem, from 130 km upstream to the estuary, was regulated by hydropower projects, making the water cooler in summer relative to tributaries and adjacent watersheds. Arctic char (*Salvelinus alpinus*) of the Coppermine River in Nunavut is also known to overwinter in freshwater below a major fall acting like a migratory obstacle instead of directly in the fluvial environment (Smith 2020). It appears that overwintering in the dynamic main fluvial stem is likely to be energetically costly and hazardous, mostly because of the ice accumulation, slush, anchor ice and hanging ice dams (Smith 2020).

This study shed some light on the importance of optimising the ecological knowledge of salmonids populations (Bennett *et al.* 2017; Cooke *et al.* 2019; Bower *et al.* 2020; Koemle *et al.* 2021). Now, as Atlantic Salmon's contingents cannot be discriminated *in situ* by anglers, within-catchment differences in migration strategies should be considered in fisheries management practices (Deslauriers *et al.* 2018; Ruokonen *et al.* 2019). Considering global ecosystemic changes, the importance of maintaining the full diversity of migratory contingents, including the estuary growth salmon, must be considered in both recreational and subsistence fisheries.

#### *Acknowledgements*

We are grateful to all persons who participated to the field studies conducted by *Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs* (MFFP) in the Koksoak River. We also offer our sincere thanks to Zec Saumon-Gaspé, Conseil d'Innu Takuaikan Uashat mak Mani-

utenam (ITUM), Micmac Nation of Gespeg and all angling enthusiasts for providing samples. This work was financially supported by Société du Plan Nord, Chaire de recherche sur les espèces aquatiques exploitées (CREAE) and Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies (FRQNT).

## CONCLUSION GÉNÉRALE

### *Occurrence des saumons atlantique estuariens dans la rivière Koksoak*

Les résultats scalimétriques et otolithométriques de cette étude mettent en lumière l'occurrence de saumons atlantique réalisant des migrations vers des milieux saumâtres plutôt que jusqu'en mer dans la rivière Koksoak au Nunavik tel que mentionnés dans les études antérieures au Québec nordique (Hayeur *et al.* 1984; Robitaille *et al.* 1984b; Robitaille *et al.* 1984a; Belzile *et al.* 1990). *A fortiori*, les résultats d'inventaire les plus récents réalisés en 2018 et 2019 dans le réseau hydrographique de la Koksoak montrent que ce contingent estuarien occuperait une part considérable de la population totale. Les proportions relatives des saumons estuariens semblent d'ailleurs supérieures à celles estimées dans les années 1980, même si les sites et dates d'échantillonnage diffèrent (Belzile *et al.* 1990). À l'heure actuelle, les données environnementales limitées et le manque de suivi temporel et spatial ne permettent pas d'identifier les causes de cette tendance. Cependant, les changements écosystémiques globaux actuels et les pressions anthropiques dorénavant omniprésentes (i.e. barrage hydroélectrique dans le bassin versant de la Caniapiscau) constituent les principales hypothèses de cette évolution potentielle (Robertson *et al.* 2013; Otero *et al.* 2014; Forseth *et al.* 2017; Nicola *et al.* 2018; Czorlich *et al.* 2021; Dadswell *et al.* 2021).

Il faut dire en effet que plusieurs études récentes témoignent d'une évolution temporelle des comportements migratoires du saumon atlantique. Le déclin des populations de l'espèce est généralement associé aux facteurs environnementaux du milieu marin; il est cependant probable que ces variations soient également dues à des phénomènes en eau douce (Klemetsen *et al.* 2003). Les changements environnementaux abrupts et irréversibles dans les écosystèmes arctiques d'eau douce nécessitent donc un suivi standardisé (Heino *et al.*



2020). L'augmentation progressive de la température de l'eau de surface (Otero *et al.* 2014; Jonsson *et al.* 2016), la modification des régimes hydriques (i.e. débit de l'eau) et l'augmentation de la fréquence d'événements climatiques extrêmes (chaleur, sécheresse) constituent les principaux changements environnementaux affectant directement la survie, le succès reproducteur et les patrons migratoires (Nicola *et al.* 2018). Indirectement, les changements dans les réseaux trophiques des milieux fréquentés par les saumons y jouent aussi un rôle (Nicola *et al.* 2018; Thomas *et al.* 2019), incluant la progression septentrionale d'espèces endémiques méridionales (p. ex. la diminution de la connectivité des milieux par le castor (*Castor canadensis*) (Grudzinski *et al.* 2022)), l'arrivée d'espèce exotiques envahissantes (p. ex. saumon rose (*Oncorhynchus gorbuscha*) (Paulsen *et al.* 2022)) et de nouvelles maladies (p. ex. l'ectoparasite *Neoparamoeba perurans* causant la maladie amibienne des branchies (Botwright *et al.* 2021)).

Puisque la plasticité phénotypique migratoire des saumons est assujettie aux processus de sélection naturelle, il importe de considérer la tendance évolutive dans la gestion et la conservation des stocks, d'autant plus dans un écosystème changeant (Garcia De Leaniz *et al.* 2007; Otero *et al.* 2014; Birnie-Gauvin *et al.* 2019). D'abord, comme la croissance et le taux de survie des individus de populations plus méridionales semblent particulièrement affectées par ces changements écosystémiques, un déplacement progressif vers le Nord de l'aire de distribution est prévisible (Otero *et al.* 2014; Nicola *et al.* 2018; Olmos *et al.* 2019; Rikardsen *et al.* 2021; Tréhin *et al.* 2021). De plus, en réponse à l'augmentation progressive de la température de l'eau de surface des milieux marins, la différence de température avec l'habitat d'eau douce diminue; la dévalaison des saumoneaux semble ainsi se déclencher de plus en plus tôt au printemps (Otero *et al.* 2014). L'avantage probable de cette adaptation

serait de minimiser l'écart de température expérimentée par les saumoneaux en estuaire entre l'eau douce provenant de la rivière et l'eau salée de la mer (Otero *et al.* 2014). Les migrations subséquentes seraient également influencées par les conditions environnementales (Hayes et Kocik 2014; Otero *et al.* 2014; Nevoux 2021). Par exemple, un bas débit d'eau et une température de l'eau élevée dans une rivière et son estuaire tendraient à retarder, voire inhiber, le retour des saumons reproducteurs en rivière (Moore *et al.* 2013). À ce propos, des études mentionnent l'augmentation graduelle du nombre d'années passées en mer avant le premier retour en rivière (Bal *et al.* 2017; Armstrong *et al.* 2018). Simultanément, la taille et la masse individuelle de ces saumons reproducteurs seraient en diminution (Bal *et al.* 2017). En modifiant le potentiel reproducteur individuel, ces tendances pourraient changer de manière substantielle la structure démographique des populations (Ohlberger *et al.* 2020).

#### *Considérations de gestion des ressources renouvelables*

Quoi qu'il en soit, la proportion considérable de saumons résidants en estuaire confirmée dans le cadre de cette étude justifie des ajustements substantiels dans les mesures de gestion, autant sur la législation, que sur la protection d'habitats. Des connaissances locales autochtones et allochtones parcellaires supportent notamment l'hypothèse que les saumons estuariens seraient plus vulnérables à la pêche à la ligne, probablement parce qu'ils s'alimenteraient en eau douce contrairement aux saumons anadromes typiques, qui ne s'y alimentent pas. L'hypothèse d'une barrière physico-chimique et/ou thermique dans l'estuaire limitant la fenêtre temporelle des migrations en mer apporte également son lot d'implications. Effectivement, les saumons estuariens hibernent en eau douce; ils seraient donc soumis plus longtemps à une pression de pêche que les saumons marins, notamment au printemps lors des pêches de subsistance autochtones au filet maillant en estuaire.

Par ailleurs, la réglementation de la pêche sportive au Québec limite les prélèvements de saumon atlantique d'une longueur supérieure à 63 cm, visant ainsi la protection des femelles fertiles de grandes tailles qui caractérisent ce segment de la population (Ministère des Forêts de la Faune et des Parcs 2016). En effet, dans les populations méridionales de saumon atlantique, le segment de population d'une taille inférieure à 63 cm (petits saumons ou madeleineaux) est majoritairement constitué de saumons mâles d'un an de mer. Les saumons de plus de 63 cm sont majoritairement des femelles de 2 ans de mer ou plus (grands saumons ou saumons rédibermarins). En protégeant le segment de 63 cm et plus, on maximise le dépôt d'œufs et le recrutement des populations. Or, cet outil de gestion pourrait être mal adapté aux spécificités des populations de saumon nordiques, notamment dans le cas de la coexistence de différents contingents migratoires. La longueur seuil serait par exemple de 56 cm pour les saumons estuariens et de 76 cm pour les saumons marins dans la rivière Koksoak (Robitaille *et al.* 1982). Bien que des contingents migratoires sympatriques devraient pouvoir se reproduire entre eux et produire des descendants fertiles, il demeure qu'une prise en compte de la diversité migratoire s'avèrerait particulièrement bénéfique pour une conservation et une gestion plus durable des stocks (Birnie-Gauvin *et al.* 2019; Koed *et al.* 2020). Au regard du vaste territoire du Nord-du-Québec et du manque de données actuelles, il y a un besoin évident de promouvoir un suivi annuel dès maintenant. Le MFFP a mis en place des mécanismes de collecte de données auprès des pourvoyeurs de services de pêche récréative et travaille à développer des collaborations avec les communautés autochtones locales pour documenter l'évolution de ces stocks particuliers et pour en adapter la gestion, le cas échéant.

Les résultats de ce mémoire confirment l'efficacité de la lecture d'écailles; la fiabilité des suivis temporels subséquents s'en trouve donc d'autant plus solidifiée. De plus, outre un suivi temporel, il sera particulièrement intéressant de procéder à un suivi des stocks dans les autres rivières de la baie d'Ungava. Certains rapports techniques laissent supposer que des saumons estuariens seraient présents dans la rivière George et la rivière à la Baleine, mais la disponibilité des données est encore loin de permettre de statuer sur l'état des stocks de ces rivières. Un objectif de gestion judicieux viserait sans doute à suivre l'évolution de l'inattendu plutôt que d'attendre des résultats prévisibles (Birnie-Gauvin *et al.* 2019).

La standardisation des méthodes de lecture d'écailles serait pertinente avant de procéder à ces défis substantiels de suivi spatial et temporel, du moins de manière panquébécoise. En effet, au regard de la diversité des patrons migratoires sur le territoire, il est important d'utiliser la même terminologie, la même méthode de notation et les mêmes critères de détermination scalimétriques entre des lecteurs provenant d'organisations différentes. Cela contribuera à la reproductibilité des données le cas échéant. En outre, il serait probablement pertinent de s'inspirer des connaissances disponibles concernant d'autres espèces de salmonidés ayant des patrons migratoires similaires, tel que l'omble chevalier, pour orienter les décisions de gestion. Les particularités des populations de saumons atlantique du réseau hydrographique du lac Melville au Labrador (Sylvester *et al.* 2018), ainsi que d'autres populations de saumons situées à des latitudes nordiques pourraient probablement aussi orienter les futures avenues de recherche.

## *Chimie des otolithes*

Le développement de la méthode d'interprétation de l'histoire de vie par la chimie des otolithes représente une avancée majeure pour l'utilisation de la spectrométrie de masse dans le suivi des populations de saumons atlantique. Il en va ainsi puisque la mesure des éléments traces dans les otolithes de cette espèce peut être utilisée comme traceur des patrons migratoires lorsqu'elle est associée à des enregistrements de dépôt d'éléments traces dépendant du temps (Gemperline *et al.* 2002). Bien sûr, la présente étude était de nature exploratoire; la taille de l'échantillon est actuellement insuffisante pour inférer une méthode standardisée en prévision d'études ultérieures. Les résultats prometteurs suggèrent cependant que la chimie des otolithes pourrait constituer un outil complémentaire novateur pour suivre l'âge et la migration de spécimens matures, particulièrement ceux s'étant apparemment déjà reproduit. La chimie des écailles a été envisagée dans une étude préliminaire pour tenter d'obtenir des informations similaires, avec cependant des résultats limités. Seule l'anadromie du poisson a pu être déduite par une hausse de la concentration en Sr sur toute la surface de ses écailles dès lors qu'il était en contact de l'eau salée au moins à un moment dans sa vie (Brûlé 2019, données non-publiées).

Contrairement au calcium squelettique constituant les écailles, la matrice de carbonate de calcium des otolithes n'est pas sujette à des réabsorption minérales, ce qui accroît la fiabilité des estimations (Wright *et al.* 2001). Malgré une certaine divergence au niveau de la précision, les patrons d'accroissement des otolithes et des écailles d'un même poisson sont cohérents étant donné le processus similaire d'acquisition des éléments chimiques (Wells *et al.* 2003). Ultimement, la chimie des otolithes pourrait ainsi informer sur le cycle de vie de plusieurs autres espèces de salmonidés migrateurs, à moindre coût que

la télémétrie ou les études de capture-marquage-recapture, afin d'obtenir des données jusqu'à présent inaccessibles, faute de ressources.

## RÉFÉRENCES

- Aas O, Einum S, Klemetsen A et Skurdal J. 2011. Atlantic salmon ecology. Blackwell Publishing Ltd, Oxford, 467 p.
- Albertsen CM, Hüsey K, Serre SH, Hemmer-Hansen J et Thomsen TB. 2021. Estimating migration patterns of fish from otolith chemical composition time series. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 78 : 1512–1523.
- Almodóvar A, Nicola GG, Ayllón D, Trueman CN, Davidson I, Kennedy R et Elvira B. 2020. Stable isotopes suggest the location of marine feeding grounds of South European Atlantic salmon in Greenland. *ICES Journal of Marine Science* doi : 10.1093/icesjms/fsz258.
- April J, Guérard M, Cayer-Blais W et Cauchon V. 2019. Suivi des populations témoins de saumon atlantique au Québec: rapport scientifique 2018. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction générale de la gestion de la faune et des habitats, Direction de l'expertise sur la faune aquatique, Québec, 66 p.
- Armstrong JD, McKelvey S, Smith GW, Rycroft P et Fryer RJ. 2018. Effects of individual variation in length, condition and run-time on return rates of wild-reared Atlantic salmon *Salmo salar* smolts. *Journal of Fish Biology*, 92 : 569-578.
- Arnold S. 2021. Spatial and watercourse influences on Arctic Charr (*Salvelinus alpinus*) migration in Nunavut. Mémoire de maîtrise, University of Manitoba, Winnipeg, 126 p.
- Austin CS, Bond MH, Smith JM, Lowery ED et Quinn TP. 2019. Otolith microchemistry reveals partial migration and life history variation in a facultatively anadromous, iteroparous salmonid, bull trout (*Salvelinus confluentus*). *Environmental Biology of Fishes*, 102 : 95-104.
- Bal G, Montorio L, Rivot E, Prévost E, Baglinière JL et Nevoux M. 2017. Evidence for long-term change in length, mass and migration phenology of anadromous spawners in French Atlantic salmon *Salmo salar*. *Journal of Fish Biology*, 90 : 2375-2393.
- Barnett-Johnson R, Pearson TE, Ramos FC, Grimes CB, MacFarlane BR et Bruce MR. 2008. Tracking natal origins of salmon using isotopes, otoliths, and landscape geology. *Limnology and Oceanography*, 53 : 1633-1642.
- Barry J, Kennedy RJ, Rosell R et Roche WK. 2020. Atlantic salmon smolts in the Irish Sea: first evidence of a northerly migration trajectory. *Fisheries Management and Ecology* doi : 10.1111/fme.12433.
- Bath GE, Thorrold SR, Jones CM, Campana SE, McLaren JW et Lam JWH. 2000. Strontium and barium uptake in aragonitic otoliths of marine fish. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64 : 1705-1714.
- Beamish RJ et McFarlane GA. 1983. The forgotten requirement for age validation in fisheries biology. *Transactions of the American Fisheries Society*, 112 : 735-743.

- Belzile L, Robitaille JA et Shooner G. 1990. Synthèse des connaissances relatives à la biologie post-fraye du saumon atlantique (*Salmo salar*) en Ungava. Rapport technique canadien des sciences halieutiques et aquatiques No. 1738, 29 p.
- Bennett NJ, Roth R, Klain SC, Chan K, Christie P, Clark DA, Cullman G, Curran D, Durbin TJ, Epstein G, Greenberg A, Nelson MP, Sandlos J, Stedman R, Teel TL, Thomas R, Verissimo D et Wyborn C. 2017. Conservation social science: Understanding and integrating human dimensions to improve conservation. *Biological Conservation*, 205 : 93-108.
- Bilton HT et Jenkinson DW. 1968. Comparison of the otolith and scale methods for aging Sockeye (*Oncorhynchus nerka*) and Chum (*O. keta*) Salmon. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 25 : 1067-1069.
- Bilton HT, Flain M, Lucas F, Kearton P et Gard R. 1983. Tests on the accuracy of ageing New Zealand Quinnat salmon (*Oncorhynchus Tshawytscha*) from their scales. *Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences* No. 1199., 16 p.
- Birnie-Gauvin K et Aarestrup K. 2019. A call for a paradigm shift: Assumed-to-be premature migrants actually yield good returns. *Ecology of Freshwater Fish*, 28 : 62-68.
- Birnie-Gauvin K, Thorstad EB et Aarestrup K. 2019. Overlooked aspects of the *Salmo salar* and *Salmo trutta* lifecycles. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 29 : 749-766.
- Bøe K, Power M, Robertson MJ, Morris CJ, Dempson JB, Pennell CJ et Fleming IA. 2019. The influence of temperature and life stage in shaping migratory patterns during the early marine phase of two Newfoundland (Canada) Atlantic salmon (*Salmo salar*) populations. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 76 : 2364-2376.
- Bøe K, Power M, Robertson MJ, Morris CJ, Dempson JB, Parrish CC et Fleming IA. 2020. Influence of life-history-dependent migration strategies on Atlantic salmon diets. *ICES Journal of Marine Science*, 77 : 345-358.
- Boel M, Aarestrup K, Baktoft H, Larsen T, Søndergaard Madsen S, Malte H, Skov C, Svendsen JC et Koed A. 2014. The physiological basis of the migration continuum in brown trout (*Salmo trutta*). *Physiological and Biochemical Zoology*, 87 : 334-345.
- Boisson A et Allard M. 2020. Boulder barricades in an emerging hypertidal environment: the case of Ungava Bay, northern Quebec, Canada. *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*, 102 : 33-56.
- Bond MH. 2013. Diversity in migration, habitat use, and growth of Dolly Varden char in Chignik lakes, Alaska. Thèse de doctorat, University of Washington, 150 p.
- Bond MH, Miller JA et Quinn TP. 2015. Beyond dichotomous life histories in partially migrating populations: cessation of anadromy in a long-lived fish. *Ecology*, 96 : 1899-1910.
- Bordeleau X, Pardo SA, Chaput G, April J, Dempson B, Robertson M, Levy A, Jones R, Hutchings JA, Whoriskey FG et Crossin GT. 2019. Spatio-temporal trends in the importance



of iteroparity across Atlantic salmon populations of the northwest Atlantic. ICES Journal of Marine Science, 77 : 326-344.

Botwright NA, Mohamed AR, Slinger J, Lima PC et Wynne JW. 2021. Host-parasite interaction of Atlantic salmon (*Salmo salar*) and the ectoparasite *Neoparamoeba perurans* in Amoebic Gill Disease. Frontiers in Immunology, 12 : 672700.

Bouchard C, Lange F, Guéraud F, Rives J et Tentelier C. 2020. Sexual maturity increases mobility and heterogeneity in individual space use in Atlantic salmon (*Salmo salar*) parr. Journal of Fish Biology doi : 10.1111/jfb.14282.

Bower SD, Aas Ø, Arlinghaus R, Beard TD, Cowx IG, Danylchuk AJ, Freire KMF, Potts WM, Sutton SG et Cooke SJ. 2020. Knowledge gaps and management priorities for recreational fisheries in the developing world. Reviews in Fisheries Science & Aquaculture doi : 10.1080/23308249.2020.1770689.

Bradbury IR, Campana SE et Bentzen P. 2008. Otolith elemental composition and adult tagging reveal spawning site fidelity and estuarine dependency in rainbow smelt. Marine Ecology Progress Series, 368 : 255-268.

Brawn VM. 1982. Behavior of Atlantic salmon (*Salmo salar*) during suspended migration in an estuary, Sheet Harbour, Nova Scotia, observed visually and by ultrasonic tracking. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 39 : 248-256.

Campana SE. 1999. Chemistry and composition of fish otoliths: pathways, mechanisms and applications. Marine Ecology Progress Series, 188 : 263-297.

Campana SE. 2001. Accuracy, precision and quality control in age determination, including a review of the use and abuse of age validation methods. Journal of Fish Biology, 59 : 197-242.

Campana SE, Annand MC et McMillan JI. 1995. Graphical and statistical methods for determining the consistency of age determinations. Transactions of the American Fisheries Society, 124 : 131-138.

Campbell LA, Bottom DL, Volk EC et Fleming IA. 2015. Correspondence between scale morphometrics and scale and otolith chemistry for interpreting juvenile salmon life histories. Transactions of the American Fisheries Society, 144 : 55-67.

Chang WYB. 1982. A statistical method for evaluating the reproducibility of age determination. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 39 : 1208-1210.

Chaput G. 2012. Overview of the status of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in the North Atlantic and trends in marine mortality. ICES Journal of Marine Science, 69 : 1538-1548.

Ciepiela LR et Walters AW. 2019. Life-history variation of two inland salmonids revealed through otolith microchemistry analysis. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 76 : 1971-1981.

Cooke SJ, Twardek WM, Reid AJ, Lennox RJ, Danylchuk SC, Brownscombe JW, Bower SD, Arlinghaus R, Hyder K et Danylchuk AJ. 2019. Searching for responsible and sustainable recreational fisheries in the Anthropocene. *Journal of Fish Biology*, 94 : 845-856.

COSEPAC. 2010. Évaluation et Rapport de situation du COSEPAC sur le saumon atlantique (*Salmo salar*) au Canada. Comité sur la situation des espèces en péril au Canada, Ottawa, 162 p.

Côté Y, Babos I et Robitaille JA. 1984. Caractéristiques scalimétriques des saumons du Koksoak (Ungava, Québec). *Naturaliste canadien*, 111 : 401-409.

Cucherousset J, Ombredane D, Charles K, Marchand F et Baglinière JL. 2005. A continuum of life history tactics in a brown trout (*Salmo trutta*) population. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 62 : 1600-1610.

Czorlich Y, Aykanat T, Erkinaro J, Orell P et Primmer CR. 2021. Evolution in salmon life-history induced by direct and indirect effects of fishing. *BioRxiv* doi : <https://doi.org/10.1101/2021.01.08.425869>

Dadswell M, Spares A, Reader J, McLean M, McDermott T, Samways K et Lilly J. 2021. The decline and impending collapse of the Atlantic salmon *Salmo salar* population in the North Atlantic Ocean: a review of possible causes. *ICES Journal of Marine Science*, 69 : 1538-1548.

Debes PV, Piavchenko N, Erkinaro J et Primmer CR. 2020. Genetic growth potential, rather than phenotypic size, predicts migration phenotype in Atlantic salmon: Determinants of migration phenotypes. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 287 : 20200867.

DeCicco AL et Brown RJ. 2006. Direct validation of annual growth increments on sectioned otoliths from adult Arctic grayling and a comparison of otolith and scale ages. *North American Journal of Fisheries Management*, 26 : 580-586.

del Villar-Guerra D, Aarestrup K, Skov C et Koed A. 2014. Marine migrations in anadromous brown trout (*Salmo trutta*). Fjord residency as a possible alternative in the continuum of migration to the open sea. *Ecology of Freshwater Fish*, 23 : 594-603.

Dempson JB, Braithwaite VA, Doherty D et Power M. 2010. Stable isotope analysis of marine feeding signatures of Atlantic salmon in the North Atlantic. *ICES Journal of Marine Science*, 67 : 52-61.

Dennert AM, May-McNally SL, Bond MH, Quinn TP et Taylor EB. 2016. Trophic biology and migratory patterns of sympatric Dolly varden (*Salvelinus malma*) and Arctic char (*Salvelinus alpinus*). *Canadian Journal of Zoology*, 94 : 529-539.

Deslauriers D, Yoon GR, Earhart ML, Long C, Klassen CN et Gary Anderson W. 2018. Over-wintering physiology of age-0 lake sturgeon (*Acipenser fulvescens*) and its implications for conservation stocking programs. *Environmental Biology of Fishes*, 101 : 623-637.

- Dodson JJ, Laroche J et Lecomte F. 2009. Contrasting evolutionary pathways of anadromy in euteleostean fishes. *American Fisheries Society Symposium*, 69 : 63-77.
- Dodson JJ, Aubin-Horth N, Thériault V et Páez DJ. 2013. The evolutionary ecology of alternative migratory tactics in salmonid fishes. *Biological Reviews*, 88 : 602-625.
- Downton PR et Reddin DG. 2004. Status of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in Campbellton River, Notre Dame Bay (SFA 4), Newfoundland in 2003.
- Elias A, McLaughlin R, Mackereth R, Wilson C et Nichols KM. 2018. Population structure and genomic variation of ecological life history diversity in wild-caught Lake Superior brook trout, *Salvelinus fontinalis*. *Journal of Great Lakes Research*, 44 : 1373-1382.
- Elsdon TS et Gillanders BM. 2002. Interactive effects of temperature and salinity on otolith chemistry: Challenges for determining environmental histories of fish. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 59 : 1796-1808.
- Elsdon TS et Gillanders BM. 2005. Alternative life-history patterns of estuarine fish: Barium in otoliths elucidates freshwater residency. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 62 : 1143-1152.
- Elsdon TS et Gillanders BM. 2006. Temporal variability in strontium, calcium, barium, and manganese in estuaries: Implications for reconstructing environmental histories of fish from chemicals in calcified structures. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 66 : 147-156.
- Erkinaro J, Czorlich Y, Orell P, Kuusela J, Falkegård M, Lämsman M, Pulkkinen H, Primmer CR et Niemelä E. 2019. Life history variation across four decades in a diverse population complex of Atlantic salmon in a large subarctic river. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 76 : 42-55.
- Fleming IA. 1996. Reproductive strategies of Atlantic salmon: ecology and evolution. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 6 : 379-416.
- Fleming IA. 1998. Pattern and variability in the breeding system of Atlantic salmon (*Salmo salar*), with comparisons to other salmonids. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 55 : 59-76.
- Forseth T, Barlaup BT, Finstad B, Fiske P, Gjørseter H, Falkegård M, Hindar A, Mo TA, Rikardsen AH, Thorstad EB, Vøllestad LA et Wennevik V. 2017. The major threats to Atlantic salmon in Norway. *ICES Journal of Marine Science*, 74 : 1496-1513.
- Fortin AL, Sirois P et Legault M. 2009. Synthèse et analyse des connaissances sur la ouananiche et l'éperlan arc-en-ciel du lac Saint-Jean. 137 p.
- Gallagher CP, Howland KL et Wastle RJ. 2016. A comparison of different structures and methods for estimating age of northern-form Dolly Varden *Salvelinus malma malma* from the Canadian Arctic. *Polar Biology*, 39 : 1257-1265.

Gallagher CP, Howland KL, Sandstrom SJ et Halden NM. 2018. Migration tactics affect spawning frequency in an iteroparous salmonid (*Salvelinus malma*) from the Arctic. PLoS ONE doi : 10.1371/journal.pone.0210202.

Garcia De Leaniz C, Fleming IA, Einum S, Verspoor E, Jordan WC, Consuegra S, Aubin-Horth N, Lajus D, Letcher BH, Youngson AF, Webb JH, Vøllestad LA, Villanueva B, Ferguson A et Quinn TP. 2007. A critical review of adaptive genetic variation in Atlantic salmon: Implications for conservation. Biological Reviews, 82 : 173-211.

Gemperline PJ, Rulifson RA et Paramore L. 2002. Multi-way analysis of trace elements in fish otoliths to track migratory patterns. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 60 : 135-146.

Gillanders BM. 2005. Otolith chemistry to determine movements of diadromous and freshwater fish. Aquatic Living Resources, 18 : 291-300.

Gossieaux P, Lavoie É, Sirois P, Thibault I, Bernatchez L et Garant D. 2020. Effects of genetic origin on phenotypic divergence in brook trout populations stocked with domestic fish. Ecosphere, 11 : e03119-e03119.

Gowan C, Young MK, Fausch KD et Riley SC. 1994. Restricted movement in resident stream salmonids: A paradigm lost? Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 51 : 2626-2637.

Grant JWA, Weir LK et Steingrímsson SO. 2017. Territory size decreases minimally with increasing food abundance in stream salmonids: Implications for population regulation. Journal of Animal Ecology, 86 : 1308-1316.

Gregory SD, Ibbotson AT, Riley WD, Nevoux M, Lauridsen RB, Russell IC, Britton JR, Gillingham PK, Simmons OM, Rivot E et Durif C. 2019. Atlantic salmon return rate increases with smolt length. ICES Journal of Marine Science, 76 : 1702-1712.

Grudzinski BP, Fritz K, Golden HE, Newcomer-Johnson TA, Rech JA, Levy J, Fain J, McCarty JL, Johnson B, Vang TK et Maurer K. 2022. A global review of beaver dam impacts: Stream conservation implications across biomes. Global Ecology and Conservation, 37 : 1-15.

Halden NM, Mejia SR, Babaluk JA, Reist JD, Kristofferson AH, Campbell JL et Teesdale WJ. 2000. Oscillatory zinc distribution in Arctic char (*Salvelinus alpinus*) otoliths: the result of biology or environment? Fisheries Research, 46 : 289-298.

Hanson NN, Wurster CM, Eimf et Todd CD. 2013. Reconstructing marine life-history strategies of wild Atlantic salmon from the stable isotope composition of otoliths. Marine Ecology Progress Series, 475 : 249-266.

Haraldstad T, Haugen TO, Borgstrøm R et Jonsson B. 2016. Increased precision of growth data gained by reading multiple scales from each individual of atlantic salmon (*Salmo salar*). Fauna Norvegica, 36 : 1-7.

Harvey AC, Glover KA, Wennevik V et Skaala Ø. 2020. Atlantic salmon and sea trout display synchronised smolt migration relative to linked environmental cues. *Scientific Reports*, 10 : 1-13.

Hayes SA et Kocik JF. 2014. Comparative estuarine and marine migration ecology of Atlantic salmon and steelhead: blue highways and open plains. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 24 : 757-780.

Hayeur G, Shooner G et Robitaille JA. 1984. *The salmon of the Koksoak*. 37 p.

Heino J, Culp JM, Erkinaro J, Goedkoop W, Lento J, Rühland KM et Smol JP. 2020. Abruptly and irreversibly changing Arctic freshwaters urgently require standardized monitoring. *Journal of Applied Ecology*, 57 : 1192-1198.

Hüssy K, Limburg KE, de Pontual H, Thomas ORB, Cook PK, Heimbrand Y, Blass M et Sturrock AM. 2020. Trace element patterns in otoliths: The role of biomineralization. *Reviews in Fisheries Science and Aquaculture* doi : 10.1080/23308249.2020.1760204.

Hüssy K, Krüger-Johnsen M, Thomsen TB, Heredia BD, Næraa T, Limburg KE, Heimbrand Y, McQueen K, Haase S, Krumme U, Casini M, Mion M et Radtke K. 2021. It's elemental, my dear Watson: Validating seasonal patterns in otolith chemical chronologies. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 78 : 551-566.

Hutchings JA et Myers RA. 1985. Mating between anadromous and nonanadromous Atlantic salmon, *Salmo salar*. *Canadian Journal of Zoology*, 63 : 2219-2221.

Hutchings JA et Jones MEB. 1998. Life history variation and growth rate thresholds for maturity in Atlantic salmon, *Salmo salar*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 55 : 23-47.

Hutchings JA, Ardren WR, Barlaup BT, Bergman E, Clarke KD, Greenberg LA, Lake C, Piironen J, Sirois P, Sundt-Hansen LE et Fraser DJ. 2019. Life-history variability and conservation status of landlocked Atlantic salmon: An overview. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 76 : 1697-1708.

ICES. 2011. Report of the workshop on age determination of salmon (WKADS). 67 p.

Irgens C, Folkvord A, Otterå H et Kjesbu OS. 2020. Otolith growth and zone formation during first maturity and spawning of Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 77 : 113-123.

Irina M, Kastle CR, Helser TE, Short JA et Anderl DM. 2019. Age interpretation in eulachon (*Thaleichthys pacificus*) as suggested by otolith microchemical signatures. *Environmental Biology of Fishes*, 102 : 629-643.

Jensen AJ, Finstad B et Fiske P. 2019. The cost of anadromy: Marine and freshwater mortality rates in anadromous Arctic char and brown trout in the Arctic region of Norway. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 76 : 2408-2417.

- Jensen JLA et Rikardsen AH. 2008. Do northern riverine anadromous Arctic charr *Salvelinus alpinus* and sea trout *Salmo trutta* overwinter in estuarine and marine waters? *Journal of Fish Biology*, 73 : 1810-1818.
- Jochum KP, Nohl U, Herwig K, Lammel E, Stoll B et Hofmann AW. 2005. GeoReM: A new geochemical database for reference materials and isotopic standards. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 29 : 333-338.
- Jones KK, Cornwell TJ, Bottom DL, Campbell LA et Stein S. 2014. The contribution of estuary-resident life histories to the return of adult *Oncorhynchus kisutch*. *Journal of Fish Biology*, 85 : 52-80.
- Jonsson B et Jonsson N. 2001. Review Paper: Polymorphism and speciation in Arctic charr. *Journal of Fish Biology*, 58 : 605-638.
- Jonsson B, Jonsson N et Albretsen J. 2016. Environmental change influences the life history of salmon *Salmo salar* in the North Atlantic Ocean. *Journal of Fish Biology*, 88 : 618-637.
- Kacem A, Baglinière JL et Meunier FJ. 2013. Resorption of scales in Atlantic salmon (*Salmo salar*) during its anadromous migration: a quantitative study. *Cybium*, 37 : 199-206.
- Kelson SJ, Power ME, Finlay JC et Carlson SM. 2020. Partial migration alters population ecology and food chain length: evidence from a salmonid fish. *Ecosphere*, 11 : e03044-e03044.
- Kennedy BP, Klaue A, Blum JD, Folt CL et Nislow KH. 2002. Reconstructing the lives of fish using Sr isotopes in otoliths. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 59 : 925-929.
- Klemetsen A, Amundsen PA, Dempson JB, Jonsson B, Jonsson N, O'Connell MF et Mortensen E. 2003. Atlantic salmon *Salmo salar* L., brown trout *Salmo trutta* L. and Arctic charr *Salvelinus alpinus* (L.): a review of aspects of their life histories. *Ecology of Freshwater Fish*, 12 : 1-59.
- Koed A, Birnie-Gauvin K, Sivebæk F et Aarestrup K. 2020. From endangered to sustainable: multi-faceted management in rivers and coasts improves Atlantic salmon (*Salmo salar*) populations in Denmark. *Fisheries Management and Ecology*, 27 : 64-76.
- Koemle D, Beardmore B, Dorow M et Arlinghaus R. 2021. The human dimensions of recreational anglers targeting freshwater species in coastal ecosystems, with implications for management. *North American Journal of Fisheries Management* doi : 10.1002/nafm.10672.
- Levings C. 2016. *Ecology of salmonids in estuaries around the world: Adaptations, habitats and conservation*. UBC Press, Vancouver, 371 p.
- Limburg KE, Wuenschel MJ, Hüsey K, Heimbrand Y et Samson M. 2018. Making the otolith magnesium chemical calendar-clock tick: plausible mechanism and empirical evidence. *Reviews in Fisheries Science and Aquaculture*, 26 : 479-493.

Loewen TN, Gillis D et Tallman RF. 2009. Ecological niche specialization inferred from morphological variation and otolith strontium of Arctic charr *Salvelinus alpinus* L. found within open lake systems of southern Baffin Island, Nunavut, Canada. *Journal of Fish Biology*, 75 : 1473-1495.

Loewen TN, Carriere B, Reist JD, Halden NM et Anderson WG. 2016. Linking physiology and biomineralization processes to ecological inferences on the life history of fishes. *Comparative Biochemistry and Physiology -Part A : Molecular and Integrative Physiology*, 202 : 123-140.

Lucas MC, Baras E, Thom T, Duncan A et Slavík O. 2008. Taxonomic analysis of migration in freshwater fishes. Dans : *Migration of freshwater fishes*. Blackwell Publishing Ltd, p. 137-229.

Lynch AJ, Myers BJE, Chu C, Eby LA, Falke JA, Kovach RP, Krabbenhoft TJ, Kwak TJ, Lyons J, Paukert CP et Whitney JE. 2016. Climate change effects on North American inland fish populations and assemblages. *Fisheries*, 41 : 346-361.

Mangel M et Satterthwaite W. 2015. Modeling anadromous salmonid life-history. Dans : *Evolutionary biology of the Atlantic salmon*. p. 221-247.

Martin J, Bareille G, Beraïl S, Pécheyran C, Gueraud F, Lange F, Daverat F, Bru N, Beall E, Barracou D et Donard O. 2013. Persistence of a southern Atlantic salmon population: diversity of natal origins from otolith elemental and Sr isotopic signatures. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 70 : 182-197.

Merg ML, Dézerald O, Kreutzenberger K, Demski S, Reyjol Y, Usseglio-Polatera P et Belliard J. 2020. Modeling diadromous fish loss from historical data : Identification of anthropogenic drivers and testing of mitigation scenarios. *PLoS ONE*, 15 : e0236575-e0236575.

Mills KE, Pershing AJ, Sheehan TF et Mountain D. 2013. Climate and ecosystem linkages explain widespread declines in North American Atlantic salmon populations. *Global Change Biology*, 19 : 3046-3061.

Ministère des Forêts de la Faune et des Parcs. 2016. Plan de gestion du saumon atlantique 2016-2026. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction générale de l'expertise sur la faune et ses habitats, Direction de la faune aquatique, Québec, 40 p.

Minke-Martin V, Dempson JB, Sheehan TF et Power M. 2015. Otolith-derived estimates of marine temperature use by West Greenland Atlantic salmon (*Salmo salar*). *ICES Journal of Marine Science*, 72 : 2139-2148.

Mohammadian A, Morse B et Robert J-L. 2021. Winter impacts on cryo-hydrodynamics of an Arctic hypertidal estuary: implications on tidal-stream energy. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 7 : 459-479.

- Moore A, Privitera L et Riley WD. 2013. The behavior and physiology of migrating Atlantic salmon. Dans : Ueda H et Tsukamoto K éd. Physiology and ecology of fish migration. CRC Press, p. 28-55.
- Morissette O et Sirois P. 2021. Flowing down the river: Influence of hydrology on scale and accuracy of elemental composition classification in a large fluvial ecosystem. Science of the Total Environment, 760.
- Morissette O, Lecomte F, Verreault G, Legault M et Sirois P. 2016. Fully equipped to succeed: migratory contingents seen as an intrinsic potential for striped bass to exploit a heterogeneous environment early in life. Estuaries and Coasts, 39 : 571-582.
- Morissette O, Lecomte F, Vachon N, Drouin A et Sirois P. 2021. Quantifying migratory capacity and dispersal of the invasive Tench (*Tinca tinca*) in the St. Lawrence River using otolith chemistry. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 78 : 1628-1638.
- Morrison CM, Gallagher CP, Tierney KB et Howland KL. 2021. Freshwater early life growth influences partial migration in populations of Dolly Varden (*Salvelinus malma malma*). Polar Biology doi : 10.1007/s00300-021-02870-z.
- Myers RA. 1984. Demographic consequences of precocious maturation of Atlantic salmon (*Salmo salar*). Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 41 : 1349-1353.
- Nevoux M. 2021. Influence de l'environnement sur les traits d'histoire de vie et la dynamique des populations: Retour sur cinq cas d'études chez les oiseaux, les mammifères et les poissons. Université de Rennes 69 p.
- Nevoux M, Finstad B, Davidsen JG, Finlay R, Josset Q, Poole R, Höjesjö J, Aarestrup K, Persson L, Tolvanen O et Jonsson B. 2019. Environmental influences on life history strategies in partially anadromous brown trout (*Salmo trutta*, Salmonidae). Fish and Fisheries doi : 10.1111/faf.12396.
- Nicola GG, Elvira B, Jonsson B, Ayllón D et Almodóvar A. 2018. Local and global climatic drivers of Atlantic salmon decline in southern Europe. Fisheries Research, 198 : 78-85.
- Niemelä E, Lajunen M, Kuusela J, Haantie J, Aro P et Kalske T. 2016. Scale reading atlas for Atlantic salmon in the Barents Sea area. 2.
- Niemelä E, Orell P, Erkinaro J, Dempson JB, BrØrs S, Svenning MA et Hassinen E. 2006. Previously spawned Atlantic salmon ascend a large subarctic river earlier than their maiden counterparts. Journal of Fish Biology, 69 : 1151-1163.
- O'Connell MF et Ash EGM. 1993. Smolt size in relation to age at first maturity of Atlantic salmon (*Salmo salar*): the role of lacustrine habitat. Journal of Fish Biology, p. 551-569.
- Ogle D, Doll J, Wheeler P et Dinno A. 2021. FSA.



Ogle DH. 2016. Introductory fisheries analyses with R. Chapman and Hall, CRC Press, Ashland, Winconsin, USA, 317 p.

Ohlberger J, Schindler DE, Brown RJ, Harding JMS, Adkison MD, Munro AR, Horstmann L et Spaeder J. 2020. The reproductive value of large females : consequences of shifts in demographic structure for population reproductive potential in Chinook salmon. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences doi : dx.doi.org/10.1139/cjfas-0012.

Olmos M, Massiot-Granier F, Prévost E, Chaput G, Bradbury IR, Nevoux M et Rivot E. 2018. Evidence for spatial coherence in time trends of marine life history traits of Atlantic salmon in the North Atlantic. Fish and Fisheries doi : 10.1111/faf.12345.

Olmos M, De Pontavice H, Payne MR, Nevoux M, Prévost E, Chaput G, Du Pontavice H, Guitton J, Sheehan T, Mills K et Rivot E. 2019. Spatial synchrony in the response of a long range migratory species (*Salmo salar*) to climate change in the North Atlantic Ocean. Global Change Biology, 26 : 1-51.

Olsson IC, Greenberg LA, Bergman E et Wysujack K. 2006. Environmentally induced migration: The importance of food. Ecology Letters, 9 : 645-651.

Ombredane D et Bagliniere JL. 1992. Les écailles et leurs utilisations en écologie halieutique. Dans : Tissus durs et âge des vertébrés. p. 151-192.

Orell P, Erkinaro J, Kiljunen M, Torniaainen J, Sutela T, Jaukkuri M et Mäki-Petäys A. 2018. Short sea migration and precocious maturation in reared Atlantic salmon post-smolts in the northern Baltic Sea. ICES Journal of Marine Science, 75 : 1063-1070.

Otero J, L'Abée-Lund JH, Castro-Santos T, Leonardsson K, Storvik GO, Jonsson B, Dempson B, Russell IC, Jensen AJ, Baglinière JL, Dionne M, Armstrong JD, Romakkaniemi A, Letcher BH, Kocik JF, Erkinaro J, Poole R, Rogan G, Lundqvist H, Maclean JC, Jokikokko E, Arnekleiv JV, Kennedy RJ, Niemelä E, Caballero P, Music PA, Antonsson T, Gudjonsson S, Veselov AE, Lamberg A, Groom S, Taylor BH, Taberner M, Dillane M, Arnason F, Horton G, Hvidsten NA, Jonsson IR, Jonsson N, McKelvey S, Næsje TF, Skaala Ø, Smith GW, Sægrov H, Stenseth NC et Vøllestad LA. 2014. Basin-scale phenology and effects of climate variability on global timing of initial seaward migration of Atlantic salmon (*Salmo salar*). Global Change Biology, 20 : 61-75.

Ottaway EM et Simkiss K. 1977. A method for assessing factors influencing 'false check' formation in fish scales. Journal of Fish Biology, 11 : 681-687.

Páez DJ, Brisson-Bonenfant C, Rossignol O, Guderley HE, Bernatchez L et Dodson JJ. 2011. Alternative developmental pathways and the propensity to migrate: a case study in the Atlantic salmon. Journal of Evolutionary Biology, 24 : 245-255.

Panfili J, De Pontual H, Troadec H et Wright PJ. 2002. Manual of fish sclerochronology. 464 p.

- Paton C, Hellstrom J, Paul B, Woodhead J et Hergt J. 2011. Iolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26 : 2508-2518.
- Paulsen T, Sandlund OT, Ostborg G, Thorstad EB, Fiske P, Muladal R et Tronstad S. 2022. Growth of invasive pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) at sea assessed by scale analysis. *Journal of Fish Biology*, 100 : 218-228.
- Pavlov DS et Savvaitova KA. 2008. On the problem of ratio of anadromy and residence in salmonids (Salmonidae). *Journal of Ichthyology*, 48 : 778-791.
- Peyronnet A, Friedland KD, Maoileidigh NO, Manning M et Poole WR. 2007. Links between patterns of marine growth and survival of Atlantic salmon *Salmo salar*, L. *Journal of Fish Biology*, 71 : 684-700.
- Phillis CC, Ostrach DJ, Ingram BL et Weber PK. 2011. Evaluating otolith Sr/Ca as a tool for reconstructing estuarine habitat use. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 68 : 360-373.
- Power G. 1969. The salmon of Ungava Bay. Arctic Institute of North America, technical paper No.22, 73 p.
- Power G. 1981. Stock characteristics and catches of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in Quebec, and Newfoundland and Labrador in relation to environmental variables. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 38 : 1601-1611.
- Power G, Power M, Dumas R et Gordon A. 1987. Marine migrations of Atlantic salmon from rivers in Ungava Bay ,Quebec. *American Fisheries Society Symposium*, 1 : 364-376.
- Quinn TP et Myers KW. 2004. Anadromy and the marine migrations of Pacific salmon and trout: Rounsefell revisited. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 14 : 421-442.
- Quinn TP, McGinnity P et Reed TE. 2016. The paradox of “premature migration” by adult anadromous salmonid fishes: Patterns and hypotheses. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 73 : 1015-1030.
- R Core Team. 2021. R: A language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing. Vienna, Austria.
- Ramsay AL, Milner NJ, Hughes RN et McCarthy ID. 2011. Comparison of the performance of scale and otolith microchemistry as fisheries research tools in a small upland catchment. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 68 : 823-833.
- Ranaldi M et Gagnon M. 2008. Zinc incorporation in the otoliths of juvenile pink snapper (*Pagrus auratus Forster*): The influence of dietary versus waterborne sources. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 360 : 56-62.

- Reddin DG, Downton P, Fleming IA, Hansen LP et Mahon A. 2011. Behavioural ecology at sea of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) kelts from a Newfoundland (Canada) river. *Fisheries Oceanography*, 20 : 174-191.
- Rifflart R, Marchand F, Rivot E et Bagliniere JL. 2006. Scale reading validation for estimating age from tagged fish recapture in a brown trout (*Salmo trutta*) population. *Fisheries Research*, 78 : 380-384.
- Rikardsen AH, Righton D, Strøm JF, Thorstad EB, Gargan P, Sheehan T, Okland F, Chittenden CM, Hedger DR, Naesje TF, Renkawitz M, Sturlaugsson J, Caballero P, Baktoft H, Davidsen JG, Halttunen E, Wright S, Finstad B et Aarestrup K. 2021. Redefining the oceanic distribution of Atlantic salmon. *Scientific Reports*, 11 : 12266.
- Riley SC et Power G. 1987. Age at maturity in landlocked and anadromous Atlantic salmon parr from two Québec rivers. *Environmental Biology of Fishes*, 19 : 223-228.
- Riley WD, Eagle MO et Ives SJ. 2002. The onset of downstream movement of juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar* L., in a chalk stream. *Fisheries Management and Ecology*, 9 : 87-94.
- Robertson MJ, Dempson JB, O'Connell MF et Chaput G. 2013. Life history, status and potential impacts of climate variability and change on Atlantic salmon with emphasis on eastern Canada. Dans : Shackell NL, *et al.* éd. *Climate change impacts, vulnerabilities and opportunities analysis of the marine Atlantic Basin*. p. 169-194.
- Robitaille JA, Côté Y, Shooner G et Hayeur G. 1984a. Croissance estuarienne du saumon atlantique (*Salmo salar*) dans le fleuve Koksoak, en Ungava. 23 p.
- Robitaille JA, Côté Y, Hayeur G et Shooner G. 1984b. Particularités de la reproduction du saumon atlantique (*Salmo salar*) dans une partie du réseau Koksoak, en Ungava. Québec, 33 p.
- Robitaille JA, Côté Y, Shooner G et Hayeur G. 1986. Growth and maturation patterns of Atlantic salmon, *Salmo salar*, in the Koksoak River, Ungava, Quebec. Dans : Meerburg DJ éd. *Salmonid age at maturity*. Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences 89, p. 62-69.
- Robitaille JA, Babos I, Côté Y, Breton-Provencher M, Shooner G et Hayeur G. 1982. Biologie du saumon dans les eaux du fleuve Koksoak, en Ungava. Rapport conjoint de SAGE Ltée, du M.L.C.P. et de Gilles Shooner Inc. présenté à Hydro-Québec, Direction Environnement, 169 p.
- Roloson SD, Landsman SJ, Tana R, Hicks BJ, Carr JW, Whoriskey F et van den Heuvel MR. 2020. Otolith microchemistry and acoustic telemetry reveal anadromy in non-native rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in Prince Edward Island, Canada. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 77 : 1117-1130.

- Rouleau A et Bisaillon S. 1991. Atelier de détermination de l'âge par la scalimétrie chez le saumon atlantique mars 1987. Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, Direction régionale de la Côte-Nord, Direction de la gestion des espèces et des habitats, Québec, 65 p.
- Ruokonen TJ, Kiljunen M, Erkinaro J, Orell P, Sivonen O, Vestola E et Jones RI. 2019. Migration strategies of brown trout (*Salmo trutta*) in a subarctic river system as revealed by stable isotope analysis. *Ecology of Freshwater Fish*, 28 : 53-61.
- Schaffer WM et Elson PF. 1975. The adaptive significance of variations in life history among local populations of Atlantic salmon in North America. *Ecology*, 56 : 577-590.
- Scott WB et Crossman EJ. 1974. Poissons d'eau douce du Canada. Ministère de l'Environnement, Service des pêches et des sciences de la mer, 1026 p.
- Secor DH. 2015. Migration ecology of marine fishes. John Hopkins University Press, Baltimore, 292 p.
- Secor DH, Henderson-Arzapalo A et Piccoli PM. 1995. Can otolith microchemistry chart patterns of migration and habitat utilization in anadromous fishes? *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 192 : 15-33.
- Simmons OM, Gregory SD, Gillingham PK, Riley WD, Scott LJ et Britton JR. 2021. Biological and environmental influences on the migration phenology of Atlantic salmon *Salmo salar* smolts in a chalk stream in southern England. *Freshwater Biology*, 66 : 1581-1594.
- Smith RL. 2020. Migration timing and overwintering habitat of anadromous Arctic Char (*Salvelinus alpinus*) near Kugluktuk, Nunavut. p. 72.
- Société du Plan Nord. 2015. Le Plan Nord - Plan d'action 2015-2020. 48 p.
- Søndergaard J, Halden N, Bach L, Gustavson K, Sonne C et Mosbech A. 2015. Otolith chemistry of common sculpins (*Myoxocephalus scorpius*) in a mining polluted greenlandic fiord (Black Angel Lead-Zinc Mine, West Greenland). *Water, Air, and Soil Pollution* doi : 10.1007/s11270-015-2605-1.
- Soto DX, Trueman CN, Samways KM, Dadswell MJ et Cunjak RA. 2018. Ocean warming cannot explain synchronous declines in North American Atlantic salmon populations. *Marine Ecology Progress Series*, 601 : 203-213.
- Spares AD, Stokesbury MJW, Dadswell MJ, O'Dor RK et Dick TA. 2015. Residency and movement patterns of Arctic charr *Salvelinus alpinus* relative to major estuaries. *Journal of Fish Biology*, 86 : 1754-1780.
- Strøm JF. 2018. Ocean migration of Atlantic salmon. 56 p.

Strøm JF, Rikardsen AH, Campana SE, Righton D, Carr J, Aarestrup K, Stokesbury MJW, Gargan P, Javierre PC et Thorstad EB. 2019. Ocean predation and mortality of adult Atlantic salmon. *Scientific Reports*, 9 : 7890.

Sturrock AM, Trueman CN, Darnaude AM et Hunter E. 2012. Can otolith elemental chemistry retrospectively track migrations in fully marine fishes? *Journal of Fish Biology*, 81 : 766-795.

Sturrock AM, Hunter E, Milton JA, Johnson RC, Waring CP, Trueman CN et Eimf. 2015. Quantifying physiological influences on otolith microchemistry. *Methods in Ecology and Evolution*, 6 : 806-816.

Sylvester EVA, Beiko RG, Bentzen P, Paterson I, Horne JB, Watson B, Lehnert S, Duffy S, Clément M, Robertson MJ et Bradbury IR. 2018. Environmental extremes drive population structure at the northern range limit of Atlantic salmon in North America. *Molecular Ecology*, 27 : 4026-4040.

Tanguy JM, Ombredane D, Baglinière JL et Prunet P. 1994. Aspects of parr-smolt transformation in anadromous and resident forms of brown trout (*Salmo trutta*) in comparison with Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture*, 121 : 51-63.

Thomas K, Hansen T, Brophy D, Ó Maoiléidigh N et Fjellidal PG. 2019. Experimental investigation of the effects of temperature and feeding regime on scale growth in Atlantic salmon *Salmo salar* post-smolts. *Journal of Fish Biology*, 94 : 896-908.

Todd CD, Whyte BDM, Maclean JC, Revie CW, Lonergan ME et Hanson NN. 2014. A simple method of dating marine growth circuli on scales of wild one sea-winter and two sea-winter Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 71 : 645-655.

Todd CDCD, Hanson NNNN, Boehme L, Revie CWCW et Marques ARAR. 2020. Variation in post-smolt growth pattern of wild one sea-winter salmon (*Salmo salar* L.), and its linkage to surface warming in the eastern North Atlantic Ocean. *Journal of Fish Biology* doi : 10.1111/jfb.14552.

Tréhin C, Rivot E, Lamireau L, Meslier L, Besnard AL, Gregory SD et Nevoux M. 2021. Growth during the first summer at sea modulates sex-specific maturation schedule in Atlantic salmon. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 78 : 659-669.

Van Leeuwen TE, McLennan D, McKelvey S, Stewart DC, Adams CE et Metcalfe NB. 2016. The association between parental life history and offspring phenotype in Atlantic salmon. *Journal of Experimental Biology*, 219 : 374-382.

Vélez-Espino LA, McLaughlin RL et Robillard M. 2013. Ecological advantages of partial migration as a conditional strategy. *Theoretical Population Biology*, 85 : 1-11.

Verspoor E et Cole LJ. 1989. Genetically distinct sympatric populations of resident and anadromous Atlantic salmon, *Salmo salar*. *Canadian Journal of Zoology*, 67 : 1453-1461.

Volk EC, Bottom DL, Jones KK et Simenstad CA. 2010. Reconstructing juvenile Chinook salmon life history in the salmon river estuary, Oregon, using otolith microchemistry and microstructure. *Transactions of the American Fisheries Society*, 139 : 535-549.

Walsh CT et Gillanders BM. 2018. Extrinsic factors affecting otolith chemistry – implications for interpreting migration patterns in a diadromous fish. *Environmental Biology of Fishes*, 101 : 905-916.

Walther BD. 2019. The art of otolith chemistry: Interpreting patterns by integrating perspectives. *Marine and Freshwater Research*, 70 : 1643-1658.

Walther BD et Thorrold SR. 2006. Water, not food, contributes the majority of strontium and barium deposited in the otoliths of a marine fish. *Marine Ecology Progress Series*, 311 : 125-130.

Walther BD et Limburg KE. 2012. The use of otolith chemistry to characterize diadromous migrations. *Journal of Fish Biology*, 81 : 796-825.

Way RG, Lewkowitz AG et Bonnaventure PP. 2017. Development of moderate-resolution gridded monthly air temperature and degree-day maps for the Labrador-Ungava region of northern Canada. *International Journal of Climatology*, 37 : 493-508.

Webb J, Verspoor E, Aubin-Horth N, Romakkaniemi A et Amiro P. 2007. The Atlantic Salmon. Dans : Verspoor E, *et al.* éd. *The Atlantic salmon: genetics, conservation and management*. Blackwell Publishing Ltd, Oxford, p. 16-56.

Weitkamp LA, Goulette G, Hawkes J, O'Malley M et Lipsky C. 2014. Juvenile salmon in estuaries: comparisons between North American Atlantic and Pacific salmon populations. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 24 : 713-736.

Wells BK, Friedland KD et Clarke LM. 2003. Increment patterns in otoliths and scales from mature Atlantic salmon *Salmo salar*. *Marine Ecology Progress Series*, 262 : 293-298.

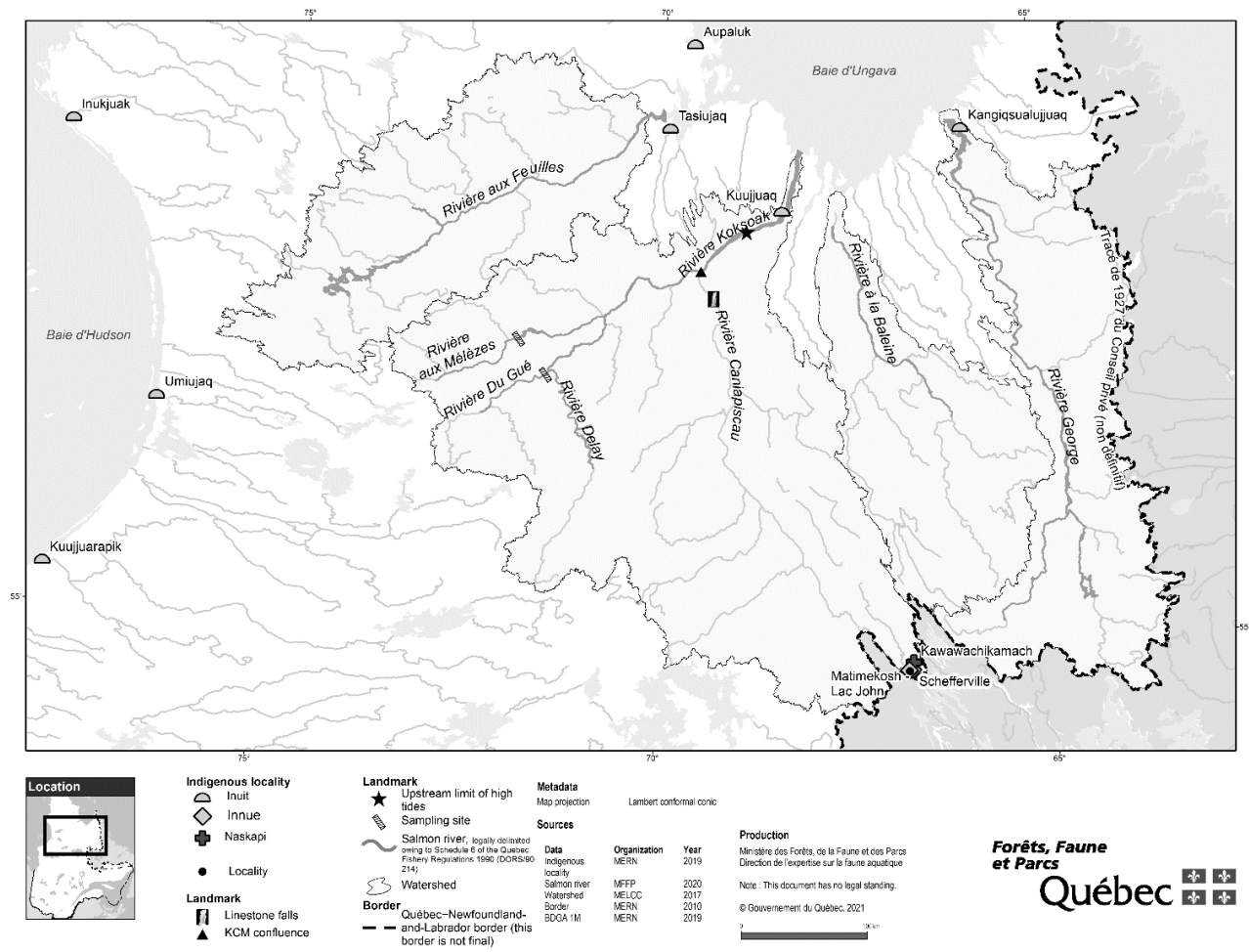
White HC et Medcof JC. 1968. Atlantic salmon scales as records of spawning history. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 25 : 2439-2441.

Whoriskey FG, Kuzhmin O et Goodhart D. 1996. Monitoring of sports fishing catches of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) of the Ponoï River, Russia, to document population characteristics. *Polskie Archiwum Hydrobiologii*, 43 : 167-177.

Whoriskey FG, Prusov S et Crabbe S. 2000. Evaluation of the effects of catch-and-release angling on the Atlantic salmon (*Salmo salar*) of the Ponoï River, Kola Peninsula, Russian Federation. *Ecology of Freshwater Fish*, 9 : 118-125.

Wright PJ, Fallon-Cousins P et Armstrong JD. 2001. The relationship between otolith accretion and resting metabolic rate in juvenile Atlantic salmon during a change in temperature. *Journal of Fish Biology*, 59 : 657-666.

Závorka L, Slavík O et Horký P. 2014. Validation of scale-reading estimates of age and growth in a brown trout *Salmo trutta* population. *Biologia*, 69 : 691-695.



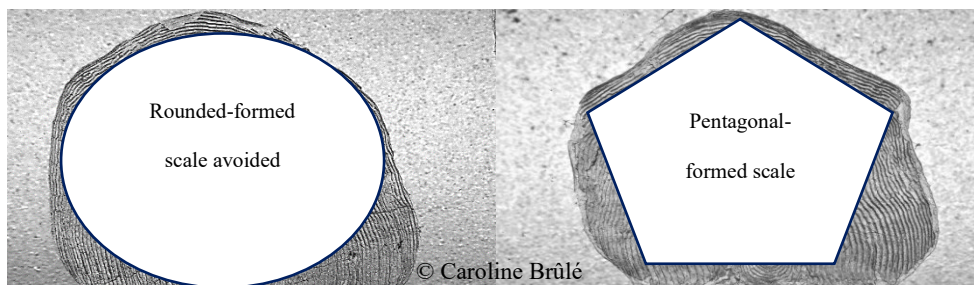
Appendix 1 Atlantic Salmon river's watersheds of Ungava Bay (Nunavik, QC) © Government of Québec



Appendix 2 Methodology for mounting scales on slide









- Petri dishes
- Solution of NaOH 1%
- Distilled water
- Fine-tipped, raw-bristle brush (2)
- Double-sided adhesive tape
- Tong
- Microscope slides
- Binocular magnifier / Optical microscope
- Absorbent paper
- Sticky labels

In the laboratory, scales were rehydrated with soap solution for 1 to 3 hours, rinsed with distilled water, then cleaned from any encrusted dirt with fine-tipped, raw-bristle brush (Snap!<sup>TM</sup> round Natural Bristle, size 0; Princeton Artist Brush Compagny, Princeton, NJ) under an optical microscope (Leica<sup>TM</sup> DM2500) with diascope light at 12-25 × magnifications. For each specimen, 6 to 8 scales were selected based on their general appearance following these criteria: (1) Degenerated or altered scales should be avoided (ICES 2011). The first annulus should be preceded by at least five circuli (Power 1969). Nucleus's radius should be smaller than 0.5 mm. (2) Pentagonal-formed scales were preferred to round-formed scales.



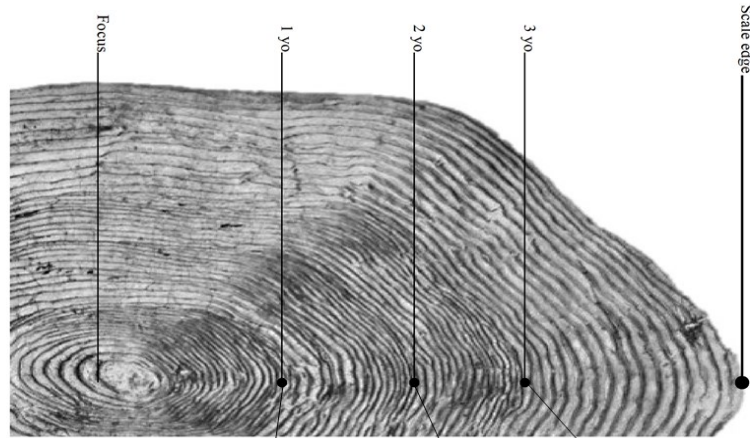
All selected scales of each salmon were mounted while still wet with their anterior side placed forward and their internal smooth side turned down on an individual glass slide (ICES 2011). Scales were then pressed on the glass slide with absorbent paper for a few seconds until dried-out to make them adhere by suction. Finally, a second glass slide labelled with individual

information was stuck onto the first one with Scotch® double-sided tape for further reading, photographing and conservation purposes. Scales were read at least two times for each specimen. When these two readings didn't match, a third reading was performed to resolve differences (Riley and Power 1987). A systematic classification was used to identify single scales on each slide (ex: Scale #C2).

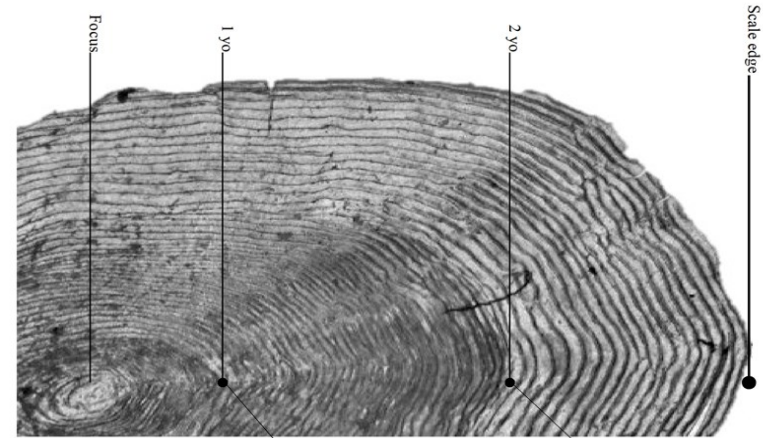
		A	B	C	D
<i>Salmo salar</i> Riv. Koksoak #Specimen Date: 2019-09-16 LF: 630 mm Poids: 1270 g Age: 3.1+ Contingent:	1				
	2				

© Caroline Brûlé

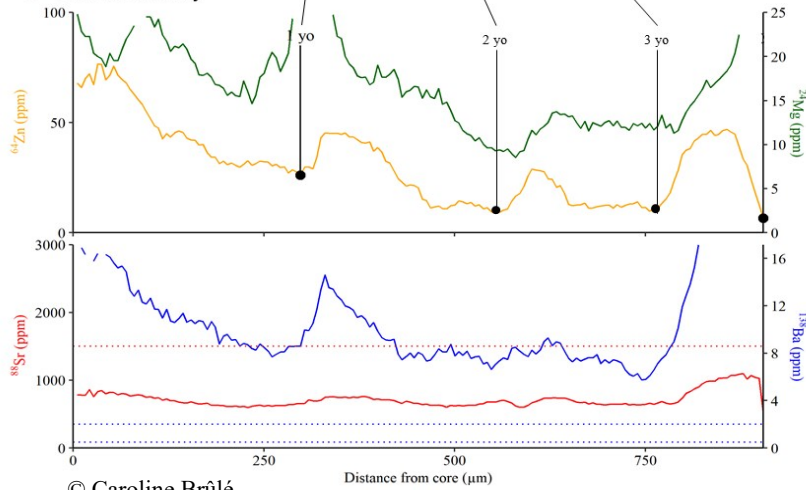
A Scale morphometry



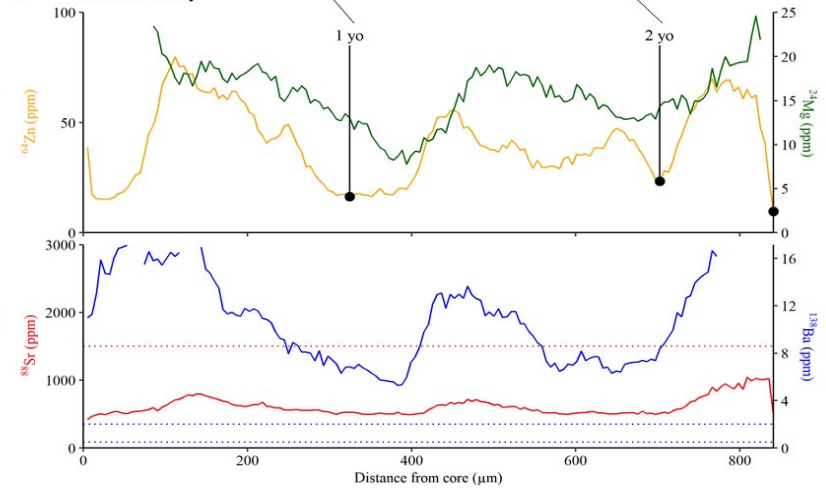
B Scale morphometry



C Otolith chemistry

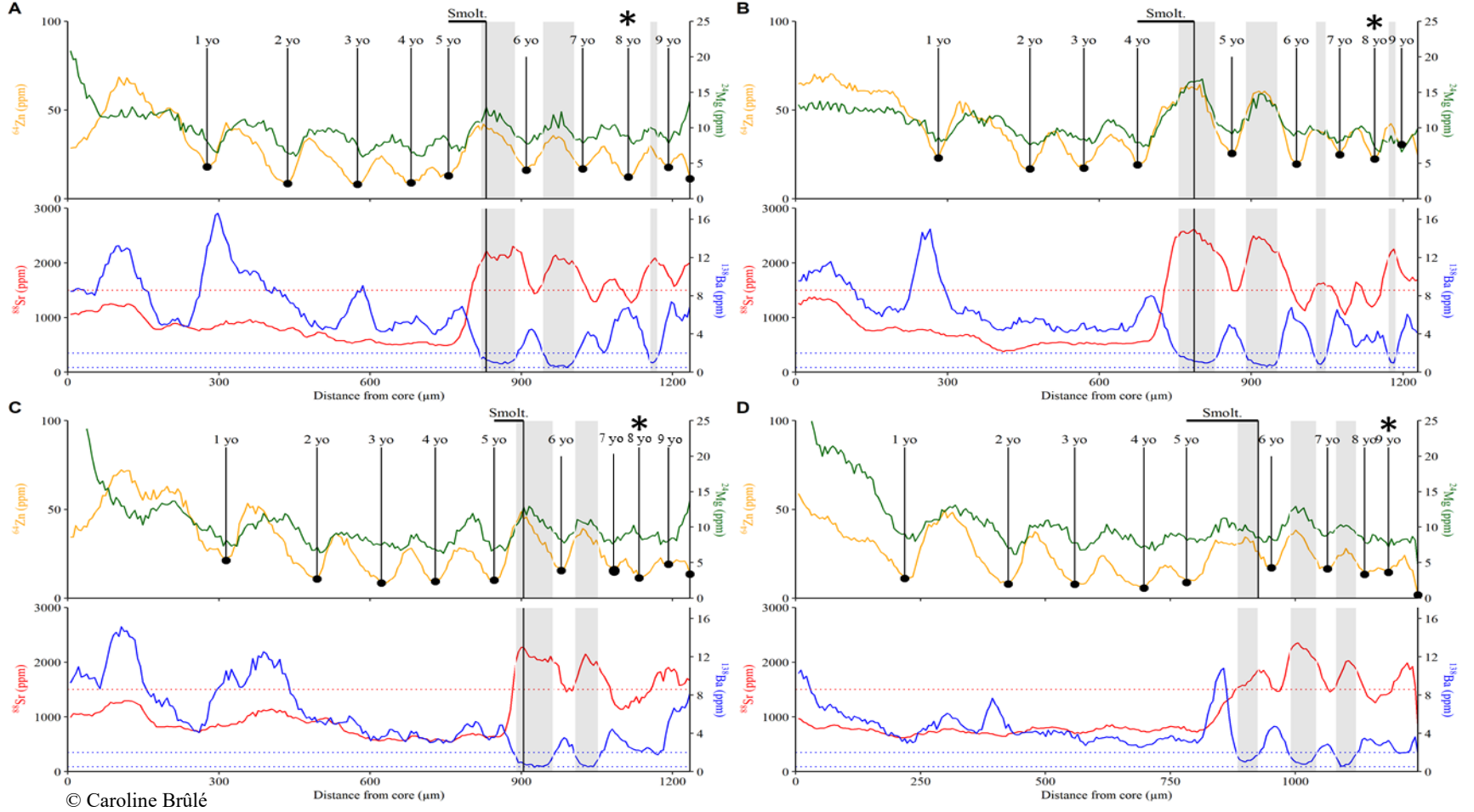


D Otolith chemistry



© Caroline Brûlé

Appendix 3 Scale reading morphometry (A & B) and otolith chemistry transect (C & D) of two smolt salmon. Both specimens were captured in Lac Saint-Jean (Saguenay-Lac-Saint-Jean) between 23<sup>th</sup> and 25<sup>th</sup> July 2019 by recreational fisheries. (A & C) 243 mm. (B & D) 225 mm.



Appendix 4 Otolith chemistry transect of four estuary growth salmon from the Du Gué River (Koksoak River, Nunavik, QC) captured between 17<sup>th</sup> and 20<sup>th</sup> Aug 2019 in a fish counting fence which exhibit a previous spawning mark on their scales (not showed). The smoltification zone (“Smolt.”) is located. Years corresponding to a spawning mark on the scale are identified by an asterisk “\*”. (A) Male, 2534 g, 633 mm, (B) Female, 3209 g, 680 mm (C) Male, 2472 g, 632 mm (D) Female, 2913 g, 673 mm.