



HAL
open science

**Étude du potentiel du rayon de nageoire pour
l'estimation de l'âge, la caractérisation du statut
migratoire et l'ascendance maternelle chez la truite
commune (*Salmo trutta*) des îles Kerguelen**

Guénard Maxime

► **To cite this version:**

Guénard Maxime. Étude du potentiel du rayon de nageoire pour l'estimation de l'âge, la caractérisation du statut migratoire et l'ascendance maternelle chez la truite commune (*Salmo trutta*) des îles Kerguelen. Sciences du Vivant [q-bio]. 2021. hal-03643226

HAL Id: hal-03643226

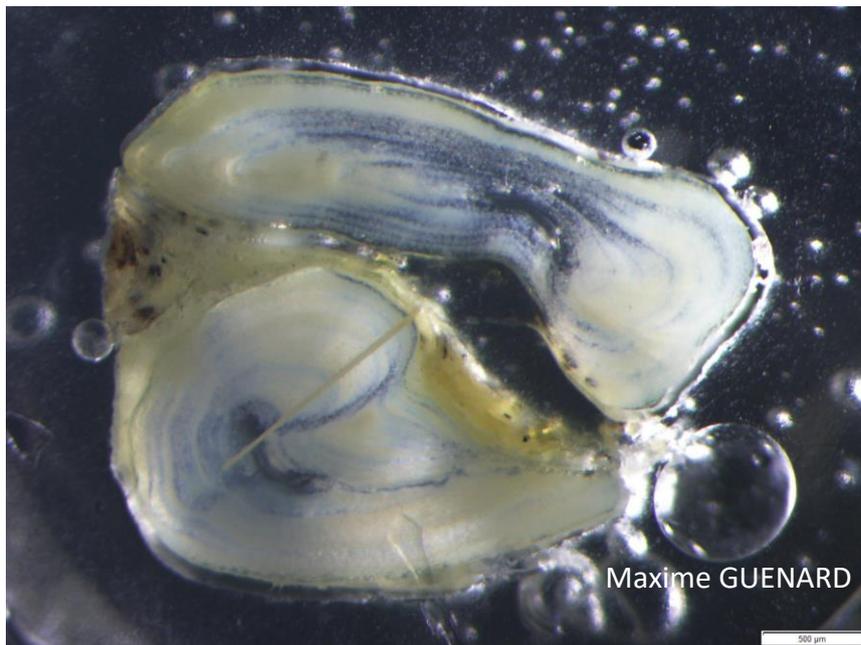
<https://hal.inrae.fr/hal-03643226v1>

Submitted on 15 Apr 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Étude du potentiel du rayon de nageoire pour l'estimation de l'âge, la caractérisation du statut migratoire et l'ascendance maternelle chez la truite commune (*Salmo trutta*) des îles Kerguelen.



INRAE/UPPA - UMR 1224 ECOBIOIP

Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement Quartier
Ibarron - 64310 Saint Pée sur Nivelle

Responsable scientifique : **J. C. AYMES**, Ingénieur d'étude – INRAE

Co-encadrante : F. DAVERAT

1^{er} Mars 2021 – 31 Août 2021

Le présent rapport constitue un exercice pédagogique qui ne peut en aucun cas engager la responsabilité de l'entreprise ou du laboratoire d'accueil

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier mon maître de stage Jean-Christophe Aymes ingénieur d'étude, pour m'avoir accordé sa confiance, sa pédagogie et sa patience sur l'ensemble du projet, et aussi pour m'avoir offert son expérience pour développer des compétences multiples aussi bien sur l'aspect technique, que théorique et humain.

Je remercie également ma co-encadrante Françoise Daverat, ingénieure, pour son soutien, sa relecture et ses conseils avisés pour améliorer la clarté et la précision de mon rapport.

Je remercie Mathias Vignon, maître de conférences, pour ses conseils précieux dans l'analyse de mes données statistiques.

Je remercie François Guéraud, technicien de laboratoire pour avoir toujours été disponible pour partager ses compétences et son expérience en scalimétrie.

Je remercie grandement Etienne Prevost, directeur de l'UMR ECOBIOP de INRAE pour m'avoir accueilli dans ses locaux.

Je remercie aussi Hélène Tabouret, Fanny Claverie et Christophe Peycheran, pour leurs accueils à L'IPREM de Pau, leurs partages d'expérience et leurs disponibilités lors de mes analyses microchimiques.

Je remercie également les membres du CRB Colisa pour la mise à disposition des échantillons et leurs critiques constructives dans l'analyse des pièces calcifiées.

Je remercie l'ensemble des stagiaires et doctorants pour avoir partagé de bons moments sur et en dehors du laboratoire. Puis, je remercie aussi l'ensemble du personnel de l'INRAE de Saint-Pée-sur-Nivelle, pour leur sympathie et leur accueil chaleureux.

Je tiens enfin à remercier ma famille et mes amis pour leur soutien depuis le début de mes études.

AVANT-PROPOS

I. Présentation de la structure d'accueil

1. Historique et localisation géographique de l'unité

L'Unité Mixte de Recherche (UMR) Ecologie Comportementale et Biologie des Populations de poissons (ECOBIOP), fut créée en 2003. Cette unité est localisée à l'Aquapôle de Saint-Pée-sur-Nivelle et sur le campus de Montaury à Anglet. L'INRAE et L'Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA) sont les organismes de tutelles de l'UMR. La majorité des activités de recherche se déroulent à Saint-Pée-sur-Nivelle et l'enseignement s'effectue sur le site d'Anglet.

2. Ecosystème de recherche

ECOBIOP est rattachée depuis 2020 (création d'INRAE) aux départements ECODIV (Ecologie et biodiversité des milieux forestiers, prairiaux et aquatiques) et AQUA (Science des écosystèmes aquatiques, des ressources en eau et des risques associés). A l'**échelle régionale**, ECOBIOP est conseillère pour le Comité de Gestion des Poissons Migrateurs (COGEPOMI). Au **niveau national**, l'unité co-anime la Zone d'Ateliers (ZA) Antarctique et contribue au « Pôle de R&D pour la gestion des poissons migrateurs amphihalins dans leur environnement » impliquant l'Office Français de Biodiversité (OFB), INRAE, l'UPPA et Agrocampus-Ouest. ECOBIOP collabore également avec le bureau d'études SCIMABIO-interface dans un but de transfert de compétences et d'innovations. Sur le **plan européen**, l'unité est partenaire de trois projets (Data Collection Framework (DCF), projet H2020 INFRAIA et Interreg SUDOANG) et a récemment initié un grand projet collaboratif grâce au soutien majeur d'E2S-UPPA (projet I-Site) et du soutien complémentaire du département ECODIV d'INRAE : Laboratoire International Associé (LIA) MacLife (MANagement and CLimate Impacts on Freshwater Ecosystems) avec les Universités California Berkeley (USA) et du Pays basque (Espagne).

3. Thématiques

La thématique principale de l'unité concerne l'étude du fonctionnement des populations de **poissons diadromes**¹ sous l'effet des perturbations anthropiques. Bien que de taille modeste, l'unité dispose d'une identité forte et fait preuve d'une excellente renommée internationale dans le domaine de l'hydrobiologie et de l'écologie des poissons migrateurs ; ces derniers constituant les marqueurs identitaires de l'unité. La recherche menée sur les **Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF)** est un axe fort, d'une grande originalité, notamment dans le contexte des effets du changement climatique, qui est une thématique de recherche que l'unité veut développer dans les cinq prochaines années.

4. Structure

Le directeur de l'UMR depuis 2016 est M. Etienne Prévost (DU) et sa DU Ajointe (DUA) est Mme Valérie Bolliet (depuis 2011). L'équipe est composée de 22 personnels permanents en activité (Professeurs, Maîtres de conférences, Directeurs de recherche, Chargés de recherche et autres personnels...) et de 9 personnels non titulaires (Chercheurs non titulaires, émérites, Doctorants et autres...) au 01 Juin 2020.

¹ Cycle de vie alternativement en mer et en eau douce.

II. Contexte environnemental

1. Les Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF), les îles Kerguelen

Les Terres Australes et Antarctiques sont des territoires lointains et peu impactés par les activités humaines. Ils ont été colonisés qu'au cours du 20^{ème} siècle après de rares expéditions. Les îles Kerguelen, terres émergées d'origine volcanique (45 millions d'années), abritent un paysage et une biodiversité qui ont suscité l'intérêt des scientifiques, en particulier ceux de L'INRA (Labonne et al., 2013).

2. L'introduction de salmonidés

Dans le but de rendre ces îles plus hospitalières aux populations installées dans un objectif scientifique, des campagnes de « valorisation » des îles Kerguelen à travers l'introduction d'espèces exogènes ont été réalisées (23 introductions volontaires). L'introduction de 8 espèces de salmonidés a été réalisée (8 883 350 individus) dans vingt-trois rivières, principalement pour fournir une ressource alimentaire aux scientifiques. Du fait de la très bonne adaptation de la truite commune (*S.trutta*) à ce milieu et sa colonisation d'autres rivières (45 colonisées actuellement), l'INRA a décidé d'étudier la dynamique d'invasion de ce salmonidé et les processus écologiques et biologiques qui la permettent par la mise en place d'un suivi depuis 1962. C'est notamment l'objectif du programme de recherche SALMEVOL, débuté en 2009, dirigé par l'INRA et co-financé par l'Institut Polaire Français Paul-Emile Victor (Labonne et al., 2013).

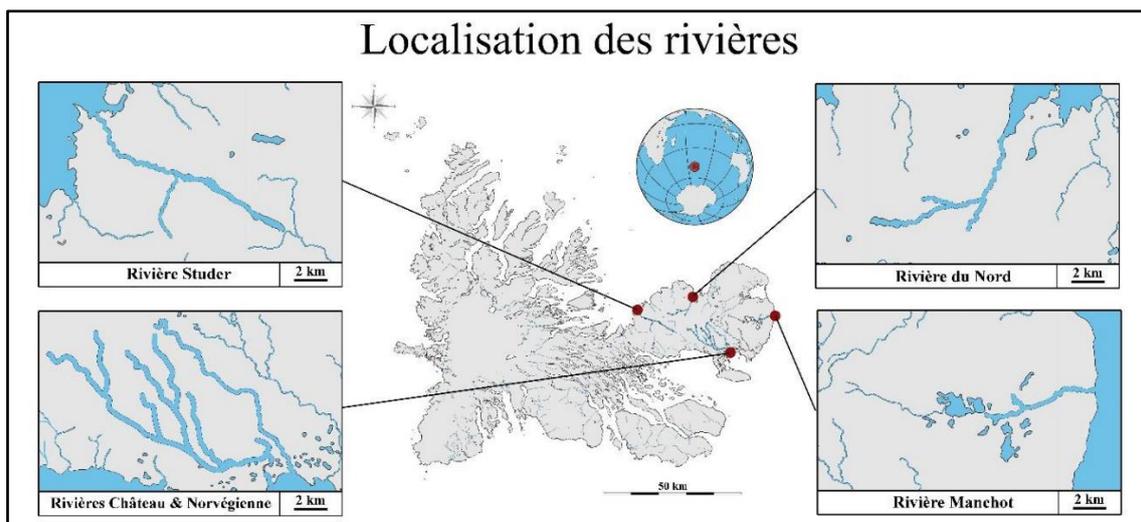


Figure 1 : Cartographie de la localisation des principales rivières de la Péninsule Courbet, Studer, Manchot, Château et Norvégienne, des îles Kerguelen (point rouge sur le globe) (H.Rogissart, 2020).

TABLE DES MATIERES

I. INTRODUCTION

- 1.Cadre général
- 2.Objectif de l'étude

II. ETAT DE L'ART : L'ETUDE DES TRAITS DE VIE DES POISSONS A PARTIR DE LA SCLROCHRONOLOGIE

III. MATERIEL ET METHODE : DEVELOPPEMENT D'UN MODE OPERATOIRE D'UTILISATION DES RAYONS DE NAGEOIRES

- 1.Modèle biologique & contexte environnemental
- 2.Méthode d'échantillonnage
- 3.Mise au point de la méthode et préparation des pièces calcifiées
 - 3.1.Dissection des rayons et préparation de l'inclusion en résine
 - 3.2.Inclusion des rayons, coupe et ponçage
- 4.Estimation de l'âge
 - 4.1.Estimation de l'emplacement du premier annulus de croissance
 - 4.2.Estimation de l'âge et mesures des distances inter-annuli

5.Définitions des zones d'études

- 5.1.La zone sous influence Vitelline : Zone V
- 5.2.La zone de développement des Juvéniles : Zone J
- 5.3.La zone de grossissement des Adultes : Zone A

6.Microchimie

- 6.1.Analyse par ablation laser couplée à la spectrométrie de masse (LA-ICP-MS)
- 6.2.Transect Laser

7.Statistique

- 7.1.HYPOTHESE 1 : Validité de l'estimation de l'âge avec le rayon de nageoire
- 7.2.Microchimie
 - 7.2.1.HYPOTHESE 2 : Test du statut migratoire, comparaison de la zone J et A
 - 7.2.2.HYPOTHESE 3 : Test de l'ascendance maternelle : comparaison de la zone V et J

IV. RESULTATS

1.HYPOTHESE 1 : Estimation de l'âge

- 1.1.Comparaison des estimations réalisées entre les rayons et les écailles
- 1.2.Comparaison des estimations réalisées entre les rayons et les otolithes
- 1.3.Comparaison des estimations réalisés entre les écailles et les otolithes
- 1.4.Bilan sur l'estimation de l'âge

2.HYPOTHESE 2 : Recherche de traceurs microchimiques de la migration des poissons

- 2.1. Comparaison intra-populationnelle des données chimiques des individus anadromes entre les zones J et A.
 - 2.1.1. Résultats pour le ratio Sr:Ca
 - 2.1.2. Résultats pour le ratio Ba:Ca
 - 2.1.3. Résultats pour le ratio Mn:Ca

2.2. Comparaison intra-populationnelle des données chimiques des individus sédentaires entre les zones J et

A

2.3. Comparaison intra-populationnelle entre les phénotypes anadrome et sédentaire des données chimiques dans la zone A

2.4.BILAN

3.Exploration des données microchimiques relatives à l'influence du milieu marin dans la zone d'influence vitelline.

3.1. Comparaison des données microchimiques entre les zones sous influence vitelline (V) et juvénile (J) selon le statut migrateur de la génitrice.

3.2. Comparaison des données microchimiques de la zone sous influence vitelline (V) selon le statut migrateur de la génitrice

3.3. Bilan

V. DISCUSSION

1.Estimation de l'âge

2.Recherche de traceurs microchimiques de la migration des poissons

3.Exploration des données microchimiques dans la zone d'influence vitelline

VI. CONCLUSION

VII. REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

VIII. ANNEXES

IX. RESUME

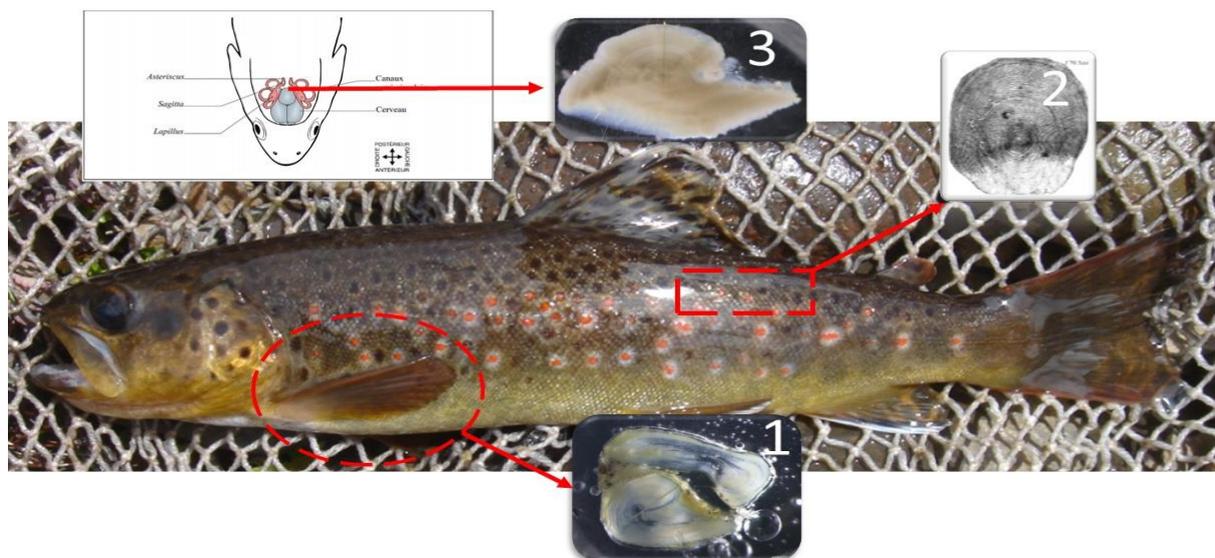


Figure 2 : Localisation des pièces calcifiées citées dans cette étude. 1 : Rayons de nageoire pectorale (méthode peu invasive), 2 : écaille prélevée sur la zone de prélèvement recommandée (méthode non-invasive), 3 : otolithe (sacrifice de l'individu), illustration M. GUENARD adaptée d'une photo prise par F. GUERAUD sur site.

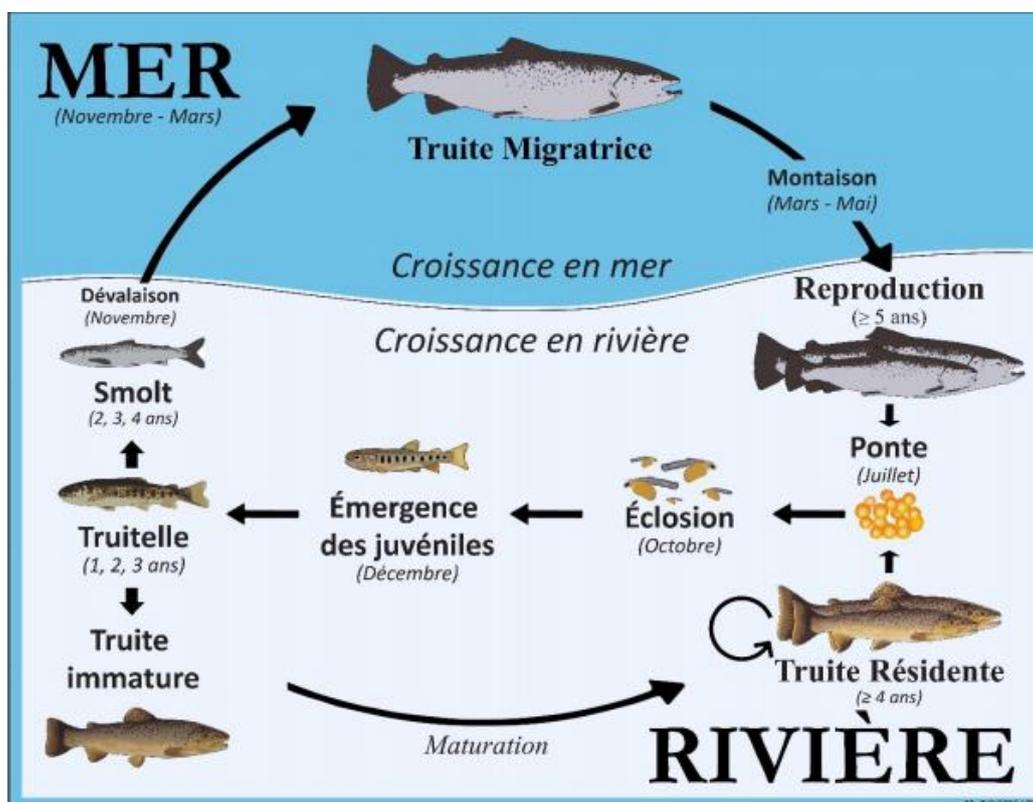


Figure 3 : Cycle de vie de la truite commune (*Salmo Trutta*) des îles Kerguelen, sous sa forme migratrice (anadrome) et résidente (illustration : H. ROGISSARD).

I. INTRODUCTION

1. Cadre général

La structure et la composition des pièces calcifiées sont utilisées depuis environ trente ans pour apporter des données individuelles originales sur l'écologie des poissons. L'âge et le statut migrateur chez la truite sont ainsi caractérisés à partir des écailles et des otolithes. La science des otolithes s'est particulièrement développée car ils se forment au stade embryonnaire, et forment des couches successives tout le long de la vie des poissons. Ils ne sont, selon l'état des connaissances actuelles et contrairement aux écailles, jamais remaniés en cas de dette de calcium (Simkiss, 1974). Pourtant, l'étude des otolithes présente un désavantage important : l'extraction de ceux-ci nécessite le sacrifice des individus. Ce sacrifice pose plusieurs problèmes, méthodologiques et éthiques. En effet, il exclut les méthodes de suivi d'individus dans le temps et ne permet plus les captures successives. Par ailleurs, les aspects éthiques et les considérations de conservation sont à prendre en compte quand un grand nombre d'études scientifiques s'intéressent à des populations en déclin ou en danger.

De ce fait, l'utilisation de la chimie des pièces calcifiées ne nécessitant pas le sacrifice, telles que les rayons de nageoire, a été envisagée et validée pour un certain nombre d'espèces (esturgeon, mérrou, ...). En effet, elles apportent des informations de qualité même si elles peuvent être dégradées par rapport à celles issues des otolithes.

2. Objectif de l'étude

Le modèle biologique choisi sera la truite commune (*Salmo Trutta*) et ses populations invasives des îles Kerguelen. L'objectif du travail sera, à l'instar des alternatives citées plus haut, de comparer les informations apportées par les rayons de nageoire à celles apportées par l'écaille et l'otolithe. Tout d'abord, l'âge sera estimé sur le rayon et comparé aux données issues des deux autres structures, écailles et otolithes (mise au jour et étude des anneaux d'arrêt de croissance hivernaux). Dans un second temps, les données de transects microchimiques obtenues du rayon par la méthode LA-ICP-MS seront analysées afin de mettre au jour notamment le statut migrateur et l'ascendance maternelle. Les ratios Sr:Ca, Ba:Ca et Mn:Ca seront les trois principaux traceurs pris en compte.

Enfin, l'étude permettra de conclure sur le potentiel des rayons pectoraux pour
1) caractériser l'âge 2) tracer les migrations marines 3) obtenir l'ascendance maternelle anadrome ou sédentaire des individus.

II. *Etat de l'Art : L'étude des traits de vie des poissons à partir de la sclérochronologie*

La capacité à déterminer la fréquence et l'étendue des déplacements entre les rivières et les autres habitats (affluents, estuaires, mer et océans) est essentielle pour la gestion efficace et la conservation des populations de poissons (Smith et Whitley, 2010). Une gestion efficace des populations requiert une connaissance des habitats utilisés et des mouvements effectués par le poisson pour déterminer l'échelle la plus appropriée à la gestion (Smith et Whitley, 2010). Les données sur l'âge et la croissance, notamment, fournissent aux biologistes les informations nécessaires pour comprendre les dynamiques de mortalité, de croissance, de recrutement, qui sont utilisées pour éclairer ces décisions de gestion.

La **Sclérochronologie**² est la discipline scientifique qui étudie les parties dures (pièces calcifiées « PC ») des organismes pour retracer l'histoire individuelle des organismes vivants. C'est la technique la plus courante pour estimer l'âge des poissons et leurs croissances (Beall et al., 1988).

La **détermination de l'âge** est réalisée grâce à l'existence de marques saisonnières sur les pièces calcifiées. Quand le ralentissement de la croissance du poisson est dû à la chute saisonnière de température, le resserrement des circoli sur l'écaille forme une marque annuelle appelée annulus (*figure 4*) (Baglinière et al., 1991). De façon similaire, les otolithes (pièce osseuse de l'oreille interne du poisson) constituées d'aragonite (carbonate de calcium (CaCO₃) dans une matrice protéique), présentent, des alternances d'anneaux clairs et sombres dits « hyaline » et « opaque » qui correspondent respectivement, à une période de croissance réduite en hiver et élevée en été, les deux zones formant une année complète (*figure 5*) (Baglinière et al., 1991). Ces structures caractéristiques nommées « annuli » sont contrôlées par des changements physiologiques également liés aux fluctuations saisonnières de l'environnement (température, nourriture disponible, reproduction) qui contrôlent le taux de croissance de la pièce (Panfili et al., 2002).

La **scalimétrie** ou l'utilisation des écailles, est souvent préférée pour estimer l'âge des poissons, c'est une méthode d'analyse non-létale et qui requiert moins d'efforts de préparation que les autres méthodes alternatives (Stolarski et al., 2008). Les écailles sont constituées de phosphate de calcium (hydroxyapatite) et sont aussi utilisées pour déterminer l'âge des poissons à la reproduction et les habitats utilisés, elles peuvent ainsi définir le statut migrateur. Les séjours marins d'individus anadromes sont distingués par des espaces inter-annulus bien plus importants. Ils sont dus à la forte croissance engendrée par l'abondance en ressource alimentaire disponible dans ce milieu (Ombredane et Baglinière, 1992) (*figure 4*).

Dans le cas d'estimation incertaine ou difficile, le recours à l'**otolithométrie** ou l'étude des otolithes est fréquent (*figure 5*). En effet, contrairement aux écailles, cette pièce osseuse est très peu remobilisée (pas de réabsorption de minéraux) (Simkiss, 1974). De plus, dans les milieux à fort contraste thermique saisonnier, l'otolithe peut aider à confirmer la présence d'anneaux sur l'écaille et en zones périphériques (ex : poissons âgés) ou centrales (ex : validation présence/absence du premier anneau hivernal) (Baglinière et al., 2020). L'otolithe n'est pas aussi fiable que la scalimétrie, pour estimer la croissance du poisson dans le cas de la truite de mer (Baglinière et al., 1986).

Le **problème majeur** de l'Otolithométrie est la nécessité systématique du sacrifice du poisson. Ceci pose un problème éthique d'autant plus lorsqu'il s'agit de populations en déclin

² Sclérochronologie : du grec ; sklêros: dur; khronos: temps; logos: étude.

et d'espèces d'intérêt patrimonial comme certaines espèces migratrices telles que la lamproie marine (*Petromyzon marinus*) ou le saumon atlantique (*Salmo salar*).

L'analyse des **rayons de nageoires**, contrairement à l'otolithométrie, permet l'étude d'espèces menacées sans accélérer leur déclin, car ils ne requièrent pas le sacrifice du poisson (Labonne et al., 2013). Chez la truite commune comme chez la plupart des téléostéens, le squelette de la nageoire pectorale est constitué de rayons osseux. Ces rayons sont constitués de phosphate de calcium (hydroxyapatite) (Tzadik et al., 2017,a). Il s'agit d'une matrice chimique qui enregistre des informations durant toute la durée de vie d'un individu (Tzadik et al., 2017,a).

Les rayons de nageoires ont un schéma de croissance unique par rapport aux os endosquelettiques. L'ostéogenèse se produit de la même manière que dans les os, sauf que de nouvelles couches dans les rayons des nageoires encapsulent les anciennes, de sorte qu'une section transversale du rayon révèle des annuli avec les couches les plus anciennes au cœur (c.-à-d. éclosion/naissance) et les couches les plus récentes au bord extérieur (Beamish et Chilton, 1977; Mills et Beamish, 1980). En effet, les rayons des nageoires se développent de façon additive et incrémentale, car les segments existants ne peuvent pas s'allonger (Tzadik et al., 2017,a). A l'instar des otolithes, la formation des annulis sur les rayons de nageoires sont indépendants de la physiologie du poisson et ne sont pas soumis à la réabsorption (Simkiss, 1974). L'utilisation des rayons de nageoires pectorales offre donc une autre possibilité pour l'estimation de l'âge des salmonidés (Zymonas et al., 2006). Deelder et Villiansee (1973) avaient déjà estimé que l'utilisation des rayons de nageoires était une bonne alternative pour les espèces européennes. Stolarski et al., 2008 ont montré que les estimations de l'âge à partir des écailles d'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*) sont supérieures à celle obtenue par les rayons. A contrario, les travaux de Mills et Beamish (1980) sur la grande corégone (*Coregonus clupeaformis*), ont montré que les rayons de nageoires étaient plus fiables que les écailles dans la détermination de l'âge. Ils déterminaient un âge supérieur à l'âge scalaire car, les coupes de rayons seraient marquées d'annuli même en période de croissance lente voire très lente, contrairement aux écailles (Mills et al., 1980). Le rayon est par conséquent un moyen plus précis pour déterminer l'âge des vieux poissons (Beamish, 1981), même si la préparation nécessaire à cette méthode est plus chronophage (Stolarski et al., 2008). Parmi les sections de nageoires ce sont les sections des rayons de nageoires pectorales qui contiennent des modèles d'alternance entre zones opaques (croissance) et zones translucides (hyaline, annulus), les plus distincts chez le colin d'Alaska (*Gadus chalcogrammus*) (Beamish, 1981).

C'est à travers les travaux de Shirvell (1981), que la méthode d'estimation de l'âge de la truite commune *Salmo trutta* à partir des rayons de nageoires a été validée³. Cependant, il existe peu de travaux sur les rayons de nageoires de truite commune et encore moins à ces latitudes. Les publications sur l'efficacité de l'utilisation des rayons de nageoire chez *Salmo trutta* et les études comparatives entre les estimations avec les différentes alternatives sont manquantes (Stolarski et al., 2008). Toutefois, les informations sur l'effet de l'amputation sur la survie des salmonidés sont limitées (Zymonas et McMahon, 2006). Ces auteurs ont montré par une étude portée sur l'omble à tête plate (*Salvelinus confluentus*), un taux de survie des poissons amputés similaire au groupe témoin pour des catégories d'âges de 3 et 4 ans. Ils notifient même que sur une excision des trois premiers rayons pelviens, 90 % de la longueur originale est régénéré en 13 mois. Cependant, d'autres études viennent nuancer ces résultats.

³ Des travaux de validation basés sur l'hypothèse simple de formation d'un anneau d'arrêt de croissance hivernal faisant suite à une capture et un marquage chimique de la pièce calcifiée. Si cet anneau est observé l'année n+1 après recapture, alors la formation d'un anneau hivernal est validée et sert de marqueur annuel (Labonne et al., 2013).

D'après Mills et Beamish (1980), les rayons ne sont plus régénérés pour les corégones après avoir atteint une taille de plus de 22 cm et des effets secondaires peuvent être occasionnés par l'excision. À court terme ces individus peuvent être soumis à des stress physiologique (Sharpe et *al.*, 1998) ou à des infections au site d'amputation (Fry, 1961). A plus long terme, l'impact pourrait affecter la nage, la croissance, la survie (Arnold et *al.*, 1991 ; Ricker, 1949 ; Coble, 1967; Nicola et Cordone, 1973). Ces effets dépendent de la régénération des nageoires, de l'espèce et de la classe de taille étudiées (Mears et Hatch, 1976). Cette méthode minimise le préjudice (Zymonas et McMahon, 2006) et reste dans tous les cas moins invasive que l'utilisation d'otolithes.

La sclérochronologie se base aussi sur la chimie. La **microchimie** est le contenu en éléments chimiques d'une pièce calcifiée (Vignon et *al.*, 2020). L'otolithométrie possède un avantage majeur dans l'étude des traits de vie des individus. En effet, la formation de cette pièce calcifiée retrace la vie entière de l'animal, dès l'embryogenèse par l'utilisation du sac vitellin lors de sa formation. Elle informe par sa chimie sur le statut migrateur de l'individu, mais aussi celui de sa génitrice (Labonne et *al.*, 2013). **L'incorporation d'éléments** dans les tissus calcifiés des poissons tels que les otolithes et les rayons des nageoires est un processus physiologiquement régulé en plusieurs étapes et qui suit des voies biochimiques complexes (Sweeney et *al.*, 2020). Le taux de régulation et les étapes physiologiques intervenant dans cette régulation sont aussi variables selon l'élément trace considéré. En outre, la composition chimique des rayons de nageoires est contrôlée par plusieurs facteurs, dont la composition chimique de l'eau, sa salinité et sa température, le régime alimentaire et la physiologie des poissons, mais aussi leur taux métabolique, leur taux de croissance et la reproduction (Campana, 1999 ; Kerr et Campana, 2014).

D'une part, le Strontium (Sr) et le Barium (Ba) sont deux éléments qui sont faiblement régulés physiologiquement et qui présentent une certaine stabilité relative (Kang et *al.*, 2014 ; Veinott et *al.*, 2014). Le Sr reflète principalement l'eau et la salinité permettant ainsi de discriminer les mouvements des individus entre la mer et l'eau douce (Panfili et *al.*, 2002). En effet, la concentration de Sr ambiant dans la mer peut être jusqu'à 8 fois plus élevées que dans l'eau douce (Gillanders, 2005). A contrario, le Ba reflète principalement le milieu d'eau douce, car il est négativement corrélé à la salinité (Thomas et *al.*, 2020). D'autre part, le Manganèse (Mn) est un élément qui subit majoritairement une forte régulation physiologique. Le Mn est un indicateur à la fois pour l'hypoxie (Le signal Mn:Ca s'estompe à mesure que l'eau environnant le poisson s'oxygène) et la croissance, son interprétation est plus complexe. Les maxima saisonniers peuvent refléter une hypoxie estivale intense, mais aussi une occupation d'habitats hypoxiques profonds pendant l'hiver (Heimbrand et *al.*, 2020).

Les données acquises de la microchimie des écailles sont très faiblement performantes pour déterminer les migrations entre les bassins-versants ainsi que l'origine natale des individus. Leurs utilisations ne sont pas recommandées (Vignon et *al.*, 2020). Ce sont les analyses de la microstructure des otolithes qui permettent de déterminer les mouvements migratoires, l'origine natale des espèces de poissons migrants, l'âge de la migration en mer, la fréquence des retours en eau douce, les conditions environnementales connues par le poisson (ratio isotope oxygène), les pollutions métalliques rencontrées et les dispersions d'individus (Perrier et *al.*, 2011 ; Campana, 1999 ; Sturrock et *al.*, 2012 ; Kerr et Campana, 2014 ; Daverat et Martin, 2016).

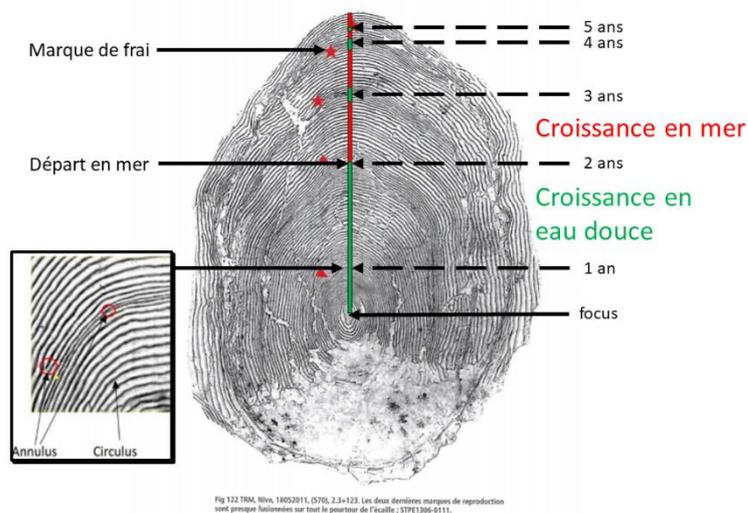


Figure 4 : Utilisation de l'écaille pour déterminer l'âge (dénombrement des annulis) et l'habitat sur l'écaille. L'image ci-dessus indique comment les espacements entre les circulis sont interprétés en termes d'environnement (la croissance en eau douce en vert et la croissance en mer en rouge).

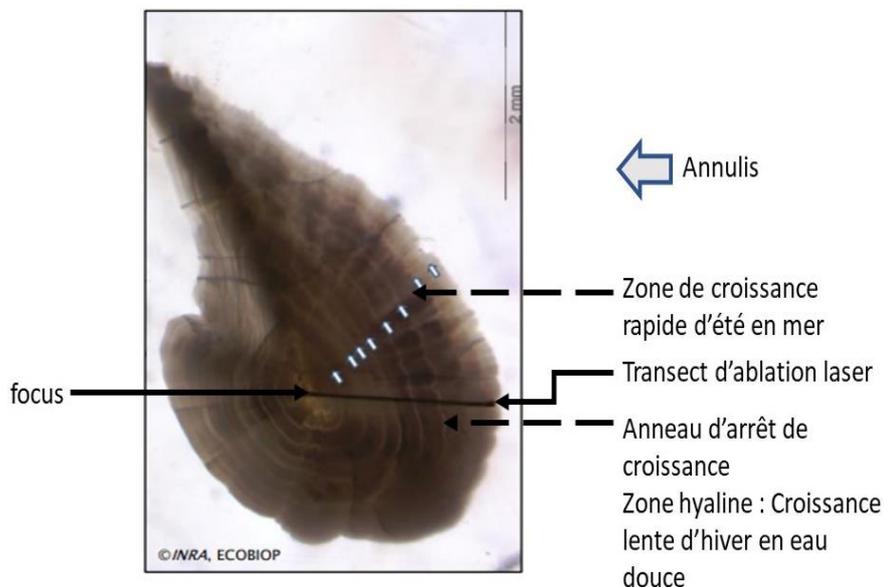


Figure 5 : Utilisation de l'otolithe pour déterminer de l'âge (dénombrement des annuli).

Dans le but d'établir une méthode alternative à l'utilisation des otolithes puisque leur extraction est létale pour le poisson, des études sur les rayons de nageoires ont débuté car les éléments traces présents dans les rayons des nageoires se trouvent généralement à des concentrations comparables à celles d'autres structures (Clarke et al., 2007). Une étude sur les mérus goliath de l'atlantique (*Epinephelus itajara*), évoque la possibilité d'assigner des individus juvéniles à leurs habitats grâce à la chimie du rayon (Tzadik et al., 2017, b). Le passage en mer des espèces migratrices pourrait aussi être perçu. En effet, dans le cas de l'esturgeon vert (*Acipenser medirostris*) une augmentation significative du rapport Sr:Ca et une diminution du rapport Ba:Ca lors du passage en mer ont été retrouvés dans la chimie des rayons. Ces résultats démontrent l'intérêt des analyses d'éléments traces des rayons des nageoires pectorales (Allen et al., 2009). Cependant, les publications sur l'efficacité de l'utilisation des rayons de nageoire pour l'analyse microchimique chez *Salmo trutta* et les études comparatives entre les différentes alternatives sont manquantes.

L'ascendance maternelle est la présence transitoire de signaux microchimiques multiélémentaires provenant de la génitrice dans la composition du noyau de l'otolithe de la progéniture (Heckel et al., 2020). Chez les poissons, l'intégration de l'ascendance maternelle commence indirectement au cours de la vitellogenèse. En effet, la mère incorpore dans le vitellus des éléments de l'eau par respiration branchiale et des réserves nutritives qui participent au développement de ses ovocytes (Kalish, 1990). L'embryon se développe dans l'œuf et se nourrit des réserves vitellines provenant de la génitrice (Kamler, 2005). Les éléments nutritifs endogènes transmis par la mère contribuent alors à la formation et la minéralisation des otolithes. Des auteurs ont constaté qu'un rapport Sr:Ca au niveau du primordium chez les descendants de génitrices anadromes pouvait avoir des valeurs 4 à 5 fois supérieures aux individus issus de génitrices résidentes en rivière (Kalish, 1990).

Chez le poisson-lait ou Chano (*Chanos Chanos*), un téléostéen, la nageoire pectorale est déjà formée lorsque l'alevin mesure 4,65 mm. La formation des rayons de la nageoire pectorale, quant à elle, commence à 13,80 mm et est complétée en nombre de rayons à 20,00 mm (Yasuhiko et al., 1986). Donc si le même schéma de développement s'applique à la truite commune, il semble possible de retrouver les traits de vie du poisson géniteur femelle depuis le stade alevin. De plus, la totale résorption du vitellus chez les alevins de truite commune s'étend jusqu'à 855 degrés-jours, à 8.8 °C de température moyenne, ceci représente 97 jours, soit plus de 3 mois après l'éclosion (Escaffre et Bergot, 1990). Théoriquement, le rayon aurait donc la capacité de fournir des informations sur la période d'influence vitelline (stade larvaire) et par conséquent sur le statut migrateur de la génitrice. Nous poserons dans cette étude les **problématiques suivantes**, la première concerne **l'estimation de l'âge** : *a.* Le rayon de nageoire, est-il capable d'estimer l'âge des poissons de la même façon que l'écaille ou l'otolithe ? la seconde porte **sur la Microchimie de cette PC** : *b.i.* Existe-t-il une influence directe du milieu marin sur la chimie du rayon (montre-t-elle un changement d'habitats pour les anadromes) ? Si oui, ces signaux permettent-ils de différencier les deux phénotypes « sédentaire » et « anadrome » ? (statut migratoire) *b.ii.* En cas d'une influence de l'habitat marin détectable sur les anadromes alors est ce que l'on peut détecter une ascendance maternelle (influence indirecte/passive) marine chez les descendants d'anadromes ?

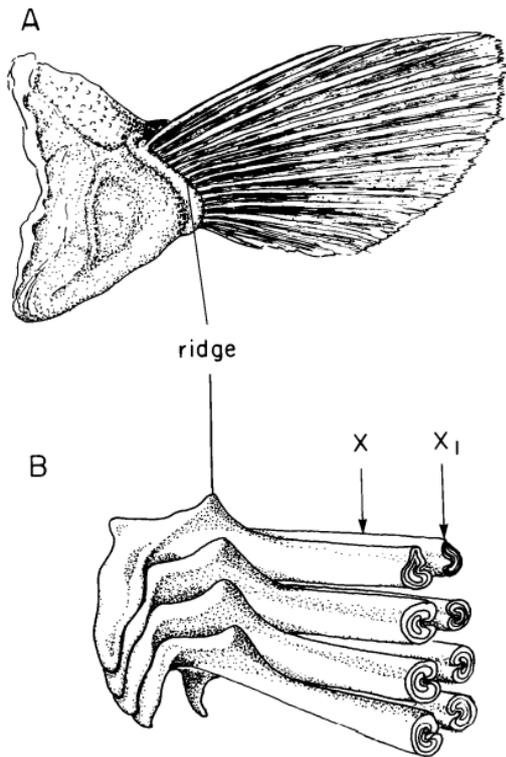


Figure 6 : Nageoire pectorale gauche (A), et ses rayons de nageoires (B). (A) montre la position de la nageoire dans le poisson. (B) montre les deux éléments (X et X1 : héli-rayons) pour chaque rayon de nageoire. (Illustration adaptée de Beamish, 1981).

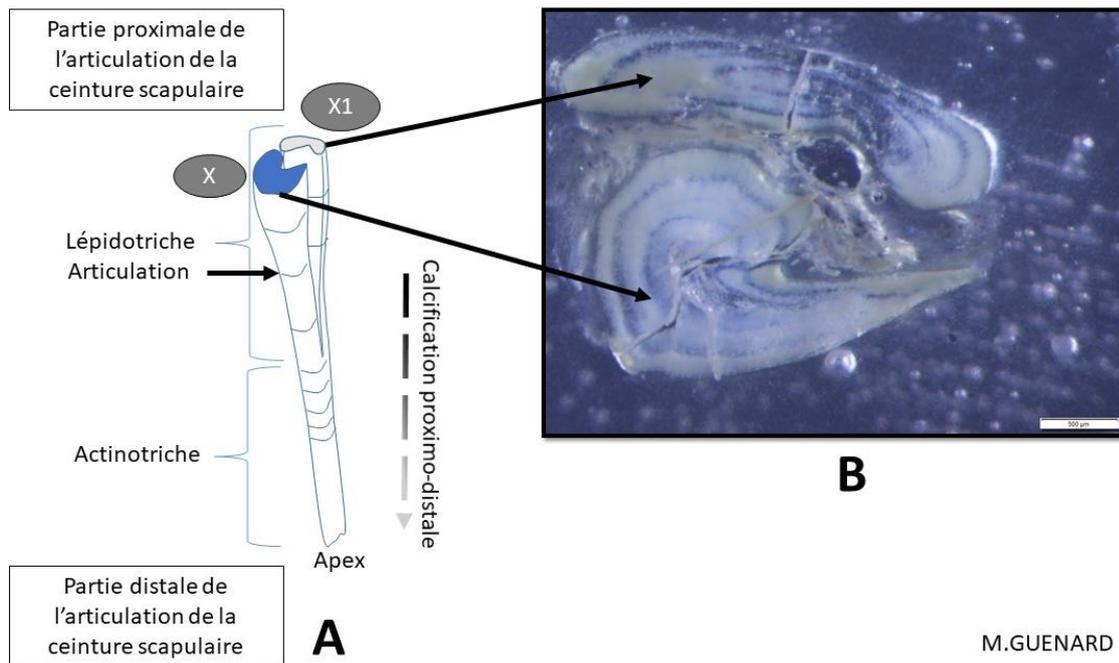


Figure 7 : 1^{er} rayon de nageoire pectorale droite, le lépidotriche, avec ses deux héli-rayons (X et X1). (A) schématise l'ossification du rayon. (B) montre les deux éléments du rayon de nageoire, sectionnés, poncés, qui ont servis pour l'étude.

M.GUENARD

Nos hypothèses sont que : sur **l'estimation de l'âge : H1** : si le rayon de nageoire permet d'ager correctement le poisson, l'âge qu'il renseigne devrait être comparable à celui déterminé par l'écaille (pièce de référence).

Pour le **test du statut migratoire : H2** : si la chimie du rayon est influencée par le milieu marin alors les ratios élémentaires des adultes anadromes durant leurs séjours en mer devraient être différents de ceux mesurés en eau douce. Les ratios des individus sédentaires, eux, ne devraient pas être distincts dans le temps. De plus, des ratios différents entre les deux phénotypes devraient donc être observés en zone adulte, lorsque les anadromes sont en mer.

Sur le **test de l'ascendance maternelle : H3** : s'il est possible d'observer une zone influencée par l'ascendance maternelle anadrome, alors les ratios élémentaires des individus d'ascendance maternelle anadrome devraient être différents de ceux qui ont une ascendance maternelle sédentaire.

Par ailleurs, pour les descendants d'anadromes, la période sous influence vitelline (stade alevin) et la période de développement des juvéniles en eau douce devraient différer à minima pour le Sr:Ca (marqueur du milieu marin dans l'otolithe). Quant aux ratios des individus porteurs d'une ascendance maternelle sédentaire, cette différence de ratios entre ces deux périodes ne devrait pas exister. Enfin, des ratios différents entre les deux types d'ascendance devraient être observés sur la période sous influence vitelline.

Enfin, l'étude permettra de conclure sur le potentiel des rayons pectoraux pour
 1) Caractériser l'âge 2) Tracer les migrations marines 3) Obtenir l'ascendance maternelle anadrome ou sédentaire des individus.

	Age à la capture		Age à la première migration marine		Croissance	Origine natale
	Jeunes	Agés	Structure PC	Chimie PC		
Ecaille	oui	dégradée	oui	?	oui	?
Otolithe	oui	oui	non	oui	dégradée	oui
Rayon de nageoire	?	?	,	?	?	?

Tableau 1 : Informations apportées par les principales pièces calcifiées.

III. *Matériel et Méthode : développement d'un mode opératoire d'utilisation des rayons de nageoires*

1. *Modèle biologique & contexte environnemental*

Dans le cadre du projet Salmevol, des échantillonnages de pièces calcifiées ont été réalisés sur 12 populations de truites communes (*Salmo Trutta*) des îles Kerguelen à divers stades et phénotypes (juvéniles, adultes, truites résidentes et migratrices). Il existe 598 poissons pour lesquels les 3 pièces calcifiées d'intérêt sont disponibles dans les collections (otolithes, écailles, rayon pectoral).

Climat : Les populations des rivières Château, Manchot et Norvégienne se trouvent dans la partie Est des îles Kerguelen (figure 1) qui est à l'abri des vents d'Ouest et des précipitations grâce à la topographie de la Grande Terre (Île principale), la Péninsule de Courbet offre à ces trois rivières un climat plus clément. Les amplitudes thermiques saisonnières sont limitées, les moyennes mensuelles estivales les plus fortes étant de 7.7 °C (février) contre 2 °C l'hiver pour les plus faibles (juillet). Les températures des différents systèmes hydrographiques présentent au contraire de forts contrastes temporels et spatiaux. (Labonne et *al.*, 2013).

Organisation des réseaux trophiques dans les rivières des Kerguelen : La très faible abondance des invertébrés aquatiques pousse les truites à adopter un comportement alimentaire ichtyophage. Elles se nourrissent partiellement ou quasi exclusivement de congénères, plus jeunes ou bien d'espèces compétitrices. Il n'est pas rare de retrouver également dans les estomacs des poissons résidents, établis proche d'estuaires, de nombreuses plumes de manchot ou des lambeaux de fourrure d'éléphant de mer. La rivière Manchots est l'une des rivières qui abrite ce genre de milieu très productif et riche en berges végétalisées qui eux, abritent de nombreux invertébrés terrestres (Labonne et *al.*, 2013).

Puisque les populations des truites dans les îles Kerguelen sont invasives, et que les contrastes saisonniers marquent les pièces calcifiées nettement (Labonne et *al.*, 2013), leurs rayons de nageoire pectorale constituent un bon modèle biologique pour cette expérimentation.

2. *Méthode d'échantillonnage*

Dans le but de réaliser des choix pertinents d'échantillons, les individus ont été sélectionnés selon plusieurs critères. Le premier est qu'une étude scalimétrique antérieure existe dans le but de comparer les différentes pièces calcifiées pour l'estimation de l'âge. Le second est un filtre sur la taille, appliqué de façon à sélectionner uniquement des individus supérieurs 20 cm. Cette taille correspond à des individus d'au moins 4 ans, âge pour lequel tous les individus de phénotype migrateur ont dévalé vers le milieu marin, car l'âge de première smoltification (âge à la première migration en mer), se produit généralement à 2, 3 ou 4 années révolues (Labonne et *al.*, 2020). Cette migration, facultative chez la truite, présente souvent une variation dans les populations, avec des individus quittant les eaux douces plus ou moins tôt. Il est souvent proposé que cette décision de migration dépende des opportunités de croissance relatives entre les deux écosystèmes (Labonne et *al.*, 2020). Le troisième critère est la présence de données microchimiques issues d'études antérieures obtenues à partir des otolithes. Enfin, le dernier critère était la présence de données issues de la chimie des eaux accueillant ces individus. Ces deux derniers critères ont servi de référence dans la comparaison avec la chimie du rayon. La discrimination des phénotypes résidents et anadromes a été réalisé d'une part, en détectant les écailles à forte croissance signifiant une migration marine, et d'autre part, par une analyse des

informations apportées par la microchimie des otolithes, en particulier sur la variabilité des ratio Sr:Ca.

In fine, les 54 individus choisis appartenait à deux populations : Manchot et Norvégienne. Pour obtenir une répartition équitable des deux phénotypes dans l'échantillonnage, des individus supplémentaires ont été ajoutés. Notamment, des individus sédentaires qui mesuraient moins de 20 cm, dont l'estimation de l'âge était de 4 années de vie au minimum. Afin d'ajouter la population Château à l'étude, vingt-neuf écailles et 10 otolithes ont été préparés et observés, correspondants à vingt-neuf individus dont les études scalimétrique et otolithométrique n'avaient pas été effectuées.

Au total, 65 rayons de nageoires pectorales ont été analysés (*Tab. 2*) parmi les 83 rayons préparés. Ces rayons appartiennent à des poissons qui ont été capturés par les équipes scientifiques de l'UMR ECOBIOP lors d'inventaires piscicoles à l'électricité de 2010 et 2011, mais aussi par pêche à la ligne dans les rivières, estuaires et en mer.

3. Mise au point de la méthode et préparation des pièces calcifiées

Au sein de l'UMR ECOBIOP, jusqu'à la présente étude, aucun mode opératoire d'utilisation des rayons de nageoires n'était enregistré ou pratiqué. J'ai donc réalisé moi-même, appuyé par mes encadrants, la totalité de la phase d'ingénierie et de mise au point de la méthode développée dans ce mémoire.

3.1. Dissection des rayons et préparation de l'inclusion en résine

Une recherche bibliographique sur la préparation de cette pièce calcifiée a d'abord été nécessaire afin d'établir une méthodologie efficace. Pour le choix du rayon parmi l'entièreté de la nageoire, je me suis basé sur l'étude de Stolarski et Hartman, 2008. Cette étude stipule que les deux premiers rayons étaient ceux qui permettaient le plus aisément l'estimation de l'âge des individus. Des sections du rayon au plus proche de l'articulation ont été privilégiées. Cette zone du rayon a été estimée pour l'Esturgeon scaphirhynque (*Scaphirhynchus platyrhynchus*) comme celle obtenant le plus fort taux de confiance dans l'estimation de l'âge inter-lecteur (Koch et al., 2008). De même Sneed (1951), sur une étude similaire portée sur les épines pectorales de poissons chat, recommandait de sectionner la PC au plus proche de la base ou dans l'articulation elle-même pour la lecture d'âge.

J'ai choisi de prélever uniquement le premier rayon de nageoire pectorale sur les échantillons disponibles, car le premier rayon est le plus épais, le plus accessible lors du prélèvement sur l'individu et qu'il me semblait être le moins pénalisant, une fois amputé, pour la fonction motrice de la nageoire chez des individus qui seraient relâchés en milieu naturel (McNeil et Crossman, 1979 ; Zymonas et McMahan, 2006).

Les nageoires pectorales échantillonnées sur le terrain n'étaient pas toutes complètes et prélevées dans des conditions optimales, c'est-à-dire amputées à 5 mm de l'articulation. Certaines d'entre elles n'étaient qu'une section des trois premiers rayons (*figure 8.C*) ou étaient coupées à un niveau plus distal, éloignées de l'articulation (*figure 8.B*).

Une fois tous les échantillons rassemblés, j'ai effectué une phase de test pour optimiser les préparations en vue des lectures d'âge et des analyses microchimiques. Les premiers essais de dissection, les premières observations sur la structure de la pièce, puis des essais d'inclusions et de coupes ont été menés sur les seconds rayons de nageoire, afin de préserver les premiers pour l'étude principale.

Populations	Sédentaires	Migrateurs	Totaux
Château	11	11	22
Manchots	6	15	21
Norvégienne	6	16	22
Totaux	23	42	65

Tableau 2 : plan d'échantillonnage final (nombre d'individus par population).

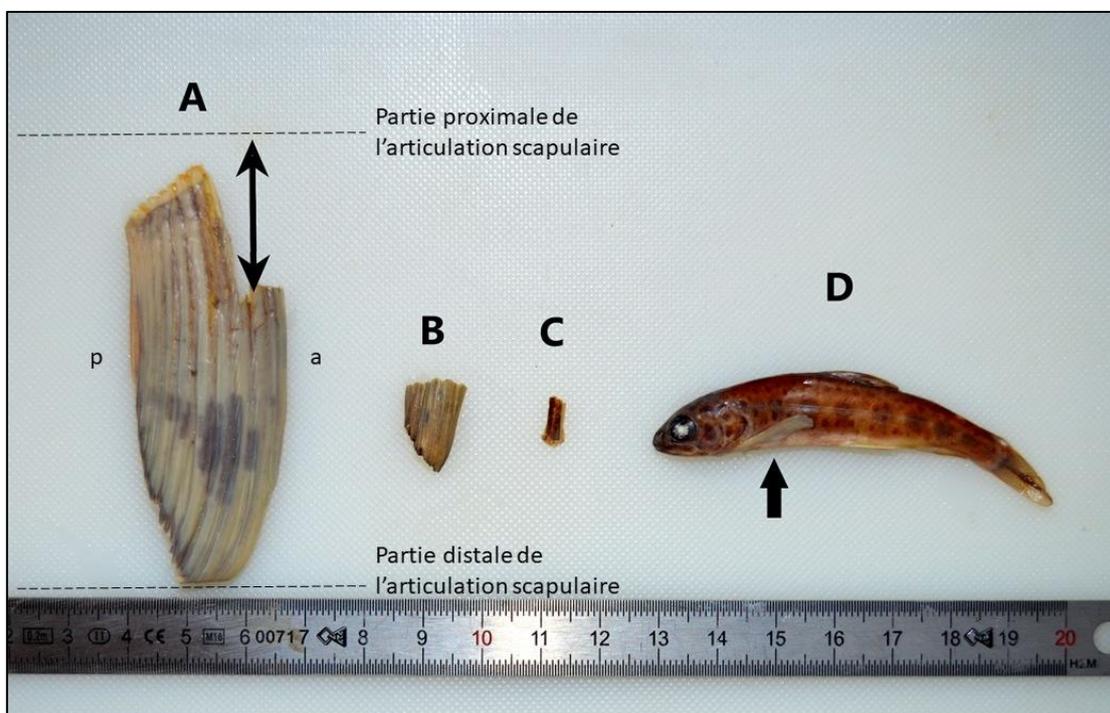


Figure 8 : Échantillons de nageoires pectorales de truites communes (*S. Trutta*), A : nageoire complète d'adulte anadrome de 6 ans (3.3+), population Château, 67.6 cm, 3 600 g, la double flèche est localisée au niveau des deux premiers rayons prélevés, le second rayon pour la phase de test et le premier pour l'étude, A : partie antérieure de la nageoire et p : partie postérieure de la nageoire, B : nageoire prélevée loin de l'articulation (incomplète), adulte résident de 7 ans (7+), 22.8 cm, 120.1 g, population Château, C : premier rayon de nageoire prélevé proche de l'articulation d'un adulte résident de 7 ans (7+), population Norvégienne, 47.2 cm et 1150 g et D : individu 1+ (en cours de 2^{nde} année), 7.3 cm, population Norvégienne.

Après optimisation de la méthode, les premiers rayons ont été excisés, nettoyés de leur derme à l'aide d'instruments de dissection en céramique, puis séchés à l'étuve à 50°C pendant 24h. Pour les échantillons dont l'entièreté du premier rayon avait été conservé, seuls une partie allant de la base de l'articulation jusqu'aux 50 % de la longueur de la pièce a été sectionnée puis incluse (*figure 8.A*).

3.2. Inclusion des rayons, coupe et ponçage

L'inclusion des rayons de nageoires (*figure 9.1*) m'a demandé d'adapter la méthode de Quist (2007). Un tube Ependoorf (1.5 mL) a été sectionné à son apex conique et a servi de moule à la résine époxy transparente (Araldite2020). Un maintien vertical de la pièce au centre du tube a été obtenu en plaçant la partie distale de l'articulation sur le bouchon du tube, légèrement enfoncée dans de la pâte à fixer (UHU patafix ®). Pour permettre un démoulage simple, un agent de démoulage (BUEHLER ® release agent) a été préalablement appliqué avant l'enrobage de la pièce. Après l'enrobage de résine, les inclusions ont été placées à l'étude à 50 °C pendant 24 h afin de permettre une bonne polymérisation. Pour les rayons incomplets et dont l'orientation à l'articulation était non visible à l'œil nu, les inclusions ont été réalisées comme pour la méthode d'inclusion des otolithes (Panfili et al., 2002) (Annexe 1). Après la polymérisation, de simples pressions appliquées sur l'extrémité des inclusions ont permis d'extirper les pièces des moules (*figure 9.2*).

Afin d'avoir une pièce manipulable et permettant un placement dans la chambre d'ablation laser, des coupes transversales des inclusions d'environ 1,5 mm d'épaisseur ont été effectuées (*figure 10.2*). Ces sections ont été réalisées grâce à une scie (Escil® SMZ-143 series) comportant un fil de découpe de \varnothing 0.17 mm intégrant des grains de diamant de 30 μ m (Annexe 2). Après optimisation des réglages (vitesse de lame et contrepoids), le temps moyen de découpe d'une section a été de 5 min.

Dans le but d'obtenir des images nettes et de mettre au jour les anneaux de croissance, un ponçage progressif a été réalisé avec du papier à poncer (p1200, p2500 et p4000, dans cet ordre, Escil ®/BUEHLER ®) et de l'eau Ultrapure (Chem-Lab ®). Pour permettre une manipulation aisée des échantillons lors du ponçage, les coupes ont été collées sur des cylindres de résines d'épaisseur 2 mm grâce à de la colle thermo fusible (Crystalbond ®) (*figure*

9.3). Une fois le ponçage optimal atteint, l'épaisseur de la section du rayon de nageoire collé au cylindre de résine était de l'ordre de 500 μ m (*figure 10.4*).

4. Estimation de l'âge

4.1. Estimation de l'emplacement du premier annulus de croissance

Dans le but d'obtenir une estimation correcte de l'âge, il est fondamental de positionner correctement le premier annulus hivernal (Aymes et al., 2016). Ce premier annulus était indiscernable sur les rayons étudiés (poissons > 4ans). Afin, d'estimer sa position approximative, des nageoires complètes d'individus 1+ (n=4) ont été incluses (*figure 11.1*) et poncées afin d'en mesurer la longueur et la largeur totale et d'en estimer une valeur moyenne (*figure 11.3*). Ces mesures ont permis d'estimer la distance moyenne théorique du premier annulus puisque les individus sélectionnés étaient en reprise de croissance lors de leur seconde année et avaient donc une bordure de rayon très proche du 1^{er} annulus hivernal. Ce patron de mesures a ensuite permis de positionner de façon systématique (mais théorique) le premier annulus sur l'ensemble des rayons individuels. La longueur moyenne du rayon à 1+ était l : 232

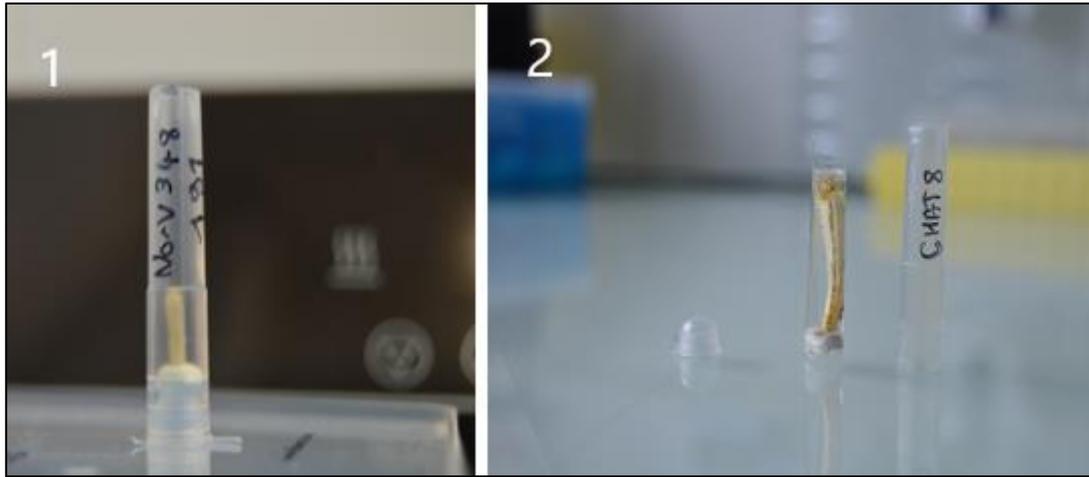


Figure 9 : Méthode d'inclusion des rayons de nageoires, 1 : moule pour enrobage du rayon avec de la résine, 2 : pièce de résine incluant le rayon, avant section à la scie.

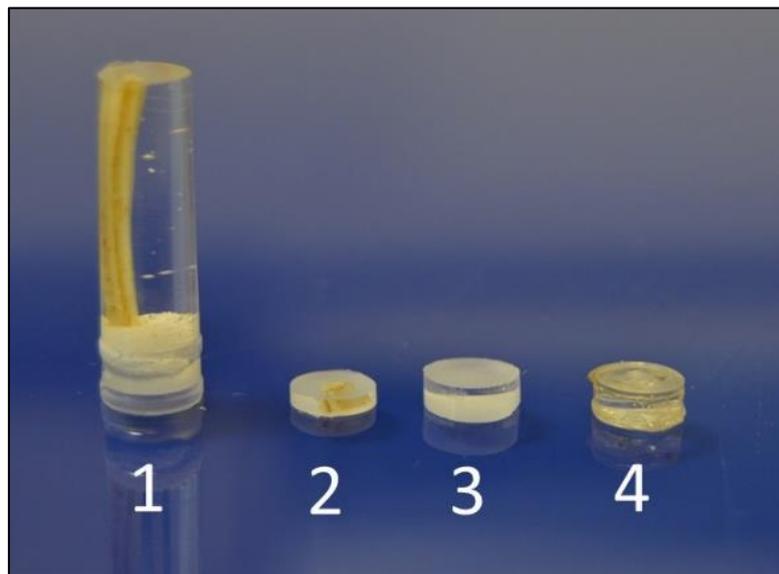


Figure 10 : Phases de préparations des échantillons, 1 : le rayon inclus dans la résine une fois sectionné, 2 : section de 1.5 mm du rayon, 3 : cylindre de résine de 2 mm accueillant la pièce 2 collée en superposition, 4 : pièce finale (2+3) poncée et prête pour l'ablation laser (LA-ICP-MS).

$\pm 50 \mu\text{m}$ et la largeur moyenne $L : 103 \pm 30 \mu\text{m}$. Ensuite, pour chaque rayon analysé, le point central (focus) a été positionné puis l'axe de la largeur a été choisi pour le positionnement des annuli. À partir du focus fixé à $0 \mu\text{m}$, la moitié de la mesure de largeur à 1+ ($51.5 \mu\text{m}$) a été considéré comme l'emplacement du premier annulus, puis les autres annuli annuels qui lui succèdent (plus visibles), ont été positionnés sur cet axe (*figure 12*).

4.2. Estimation de l'âge et mesures des distances inter-annuli

L'âge des individus a été estimé en dénombrant les stries de croissance visibles à la loupe binoculaire (Olympus SZX16) (*figure 12*). Par ailleurs, des mesures numériques de distance entre annuli de croissance ont été effectuées à partir d'images ayant subi un traitement numérique (éclairage, exposition, résolution, contraste, balance des blancs, etc.), et à l'aide de logiciels dédiés (Cell A, Zen Core, ImageJ), après la calibration de ces outils d'imagerie. Ces mesures de distances inter-annuli, une fois reportées sur les courbes de microchimies, ont permis de définir des zones d'intérêts, représentatives des phases de vie des individus ou des milieux rencontrés (zone V, J et A, voir §III, *figure 14*).

5. Définitions des zones d'études

Trois zones ont été définies sur les transects microchimiques : (voir *figure 13*). Les données microchimiques correspondant à ces 3 zones ont permis de tester toutes les hypothèses posées (voir §VI).

5.1. La zone sous influence Vitelline : Zone V

À l'instar de l'otolithe, cette zone représente la zone sous influence maternelle qui peut être résidente ou anadrome. Ne connaissant pas la distance sur laquelle l'ascendance maternelle, si elle existe, influe sur les ratios élémentaires du rayon, une distance a été déterminée arbitrairement. Comme sur l'otolithe qui présente un pic de Manganèse en son focus, une zone de $40 \mu\text{m}$ autour du pic de manganèse du rayon a été choisie de façon à ne pas empiéter sur la zone représentative de l'eau douce (*figure 13 et 14*).

5.2. La zone de développement des Juvéniles : Zone J

Cette zone est caractéristique de la vie en eau douce pour tous les poissons (sédentaires ou anadromes). Elle correspond à une zone entre 1 et 2 ans de $19.3 \mu\text{m}$ de large sur le transect. Cette valeur de $19.3 \mu\text{m}$ est la distance minimale observée entre le second anneau annuel et le premier anneau annuel théorique. La limite de zone placée au second anneau de croissance a été définie en raison du passage potentiel des individus anadromes en milieu marin après de 2 ans (voir §I, Labonne et *al.*, 2020). Ceci afin d'éviter une contamination de la zone J, indicatrice des ratios chimiques types en eau douce, par une potentielle influence du milieu marin chez des individus ayant migré dès le début de leur 3^e année (après le 2^{ème} annulus).

5.3. La zone de grossissement des Adultes : Zone A

Cette zone est caractéristique de la vie en eau de mer pour les poissons anadromes ou correspond à une phase de vie adulte en eau douce pour les poissons sédentaires. Ces individus résidents, ne partant pas en mer, ont joué le rôle de groupe témoin dans la comparaison inter-habitats (voir §VI.b.i). Tous les individus anadromes sélectionnés avaient plus d'un an passé en mer, de ce fait la zone du rayon inclue entre l'avant-dernier et le dernier anneau était une zone de croissance marine. La zone A est donc définie entre le dernier et l'avant-dernier anneau. Cette zone de $25.2 \mu\text{m}$ de large sur le transect microchimique (distance minimale observée entre le dernier anneau et l'avant-dernier anneau), a donc permis de ne pas empiéter sur d'autres zones qui ne correspondent pas au milieu marin.

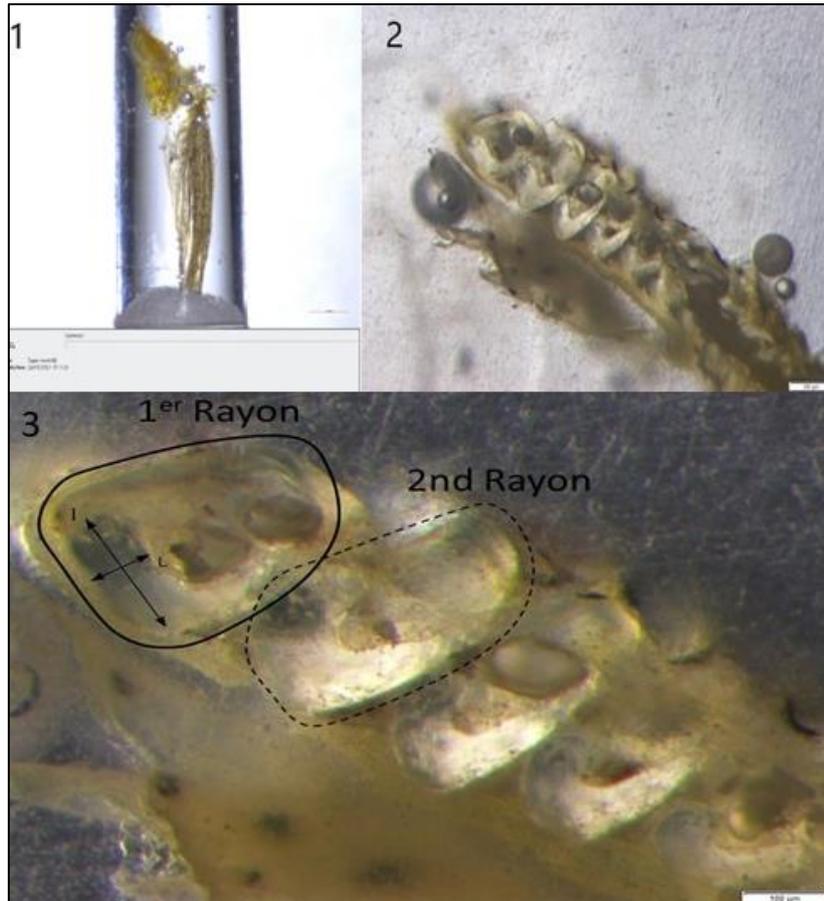


Figure 11 : Inclusion d'un rayon de juvénile 1+ (en cours de 2nde année), 1 : inclusion de la nageoire complète, 2 : coupe transversale de la nageoire, 3 : premier rayon avec mesure de la longueur l et de la largeur L pour l'estimation de l'emplacement théorique du premier annulus et second rayon de la nageoire pectorale.

6. Microchimie

6.1. Analyse par ablation laser couplée à la spectrométrie de masse (LA-ICP-MS)

Les ratios élémentaires $^{86}\text{Sr}:^{43}\text{Ca}$, $^{138}\text{Ba}:^{43}\text{Ca}$ et $^{55}\text{Mn}:^{43}\text{Ca}$ ont été analysées par un système d'ablation laser couplé à un spectromètre de masse à plasma induit (LA-ICP-MS, Annexe 3) de la plateforme PAMAL (plateforme d'Analyse des Métaux Traces par Ablation Laser) de l'IPREM (Institut des Sciences Analytiques et de la physico-Chimie pour l'Environnement et les Matériaux, Pau). Cette technique consiste à échantillonner une fine quantité de matière de la surface d'un solide grâce à un laser et à la transférer vers le spectromètre (Agilent 8900 ICP-MS Triple Quad) pour en déterminer la composition en ions d'intérêt (voir la technique complète, Annexe 3).

6.2. Transect Laser

Afin de pouvoir vérifier si, tout comme au centre de l'otolithe un signal de Manganèse en pic palindromique était présent sur les courbes microchimiques du rayon, les transects réalisés débutaient tous 200 μm avant le focus théorique et traversaient les rayons entiers jusqu'à la résine périphérique enrobant les pièces (*figure 12*). A l'instar de l'otolithe, le pic de Manganèse a permis de positionner le focus réel du rayon (début de vie de l'individu) sur son profil microchimique. Durant le traitement des données brutes, le focus a été replacé sur le transect microchimique de -4.2 μm en moyenne par rapport au focus initialement repéré à la loupe binoculaire ce qui atteste d'un positionnement visuel, relativement correct du focus du rayon.

7. Statistique

7.1. HYPOTHESE 1 : Validité de l'estimation de l'âge avec le rayon de nageoire

Afin de tester l'hypothèse d'une estimation de l'âge à partir du rayon de nageoire fiable et égale à celle de l'écaille et de l'otolithe, un test apparié de Wilcoxon (ou test U de Mann-Whitney) a été réalisé pour comparer les données d'âges par paires entre ces trois pièces calcifiées (rayon-écaille, rayon-otolithe). Ensuite, la moyenne des différences entre les estimations d'âge des trois pièces, ainsi que le pourcentage d'estimations correctes (âge de l'écaille en référence) ont été calculés. Un test inférieur au seuil de significativité fixé $\alpha = 0.05$ qui attesterait que les estimations d'âges avec les deux pièces sont identiques est attendu. Une faible moyenne des différences et un fort pourcentage de bonne estimation sont également attendus, témoignant d'une estimation correcte de l'âge par le rayon.

7.2. Microchimie

Les données chimiques utilisées pour l'étude statistique consistent simplement en trois séries de valeurs multiélémentaires appartenant aux zones définies précédemment (voir §VI.a.b.c). Ces zones ont permis de tester toutes les hypothèses posées ci-dessous (sur chaque élément), en comparant les ratios par un test de Kruskal-wallis (ANOVA non-paramétrique) avec un seuil de significativité $\alpha = 0.05$.

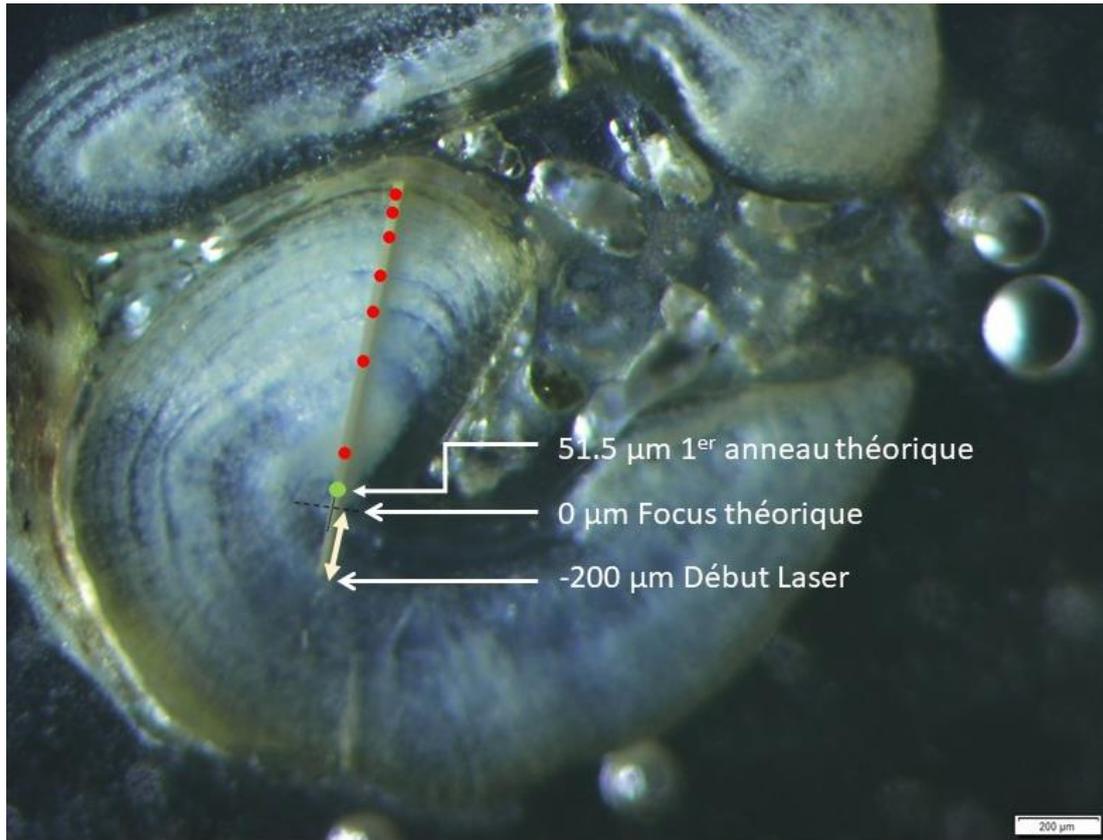


Figure 12 : Image du premier rayon de nageoire pectorale de l'individu Norv347, âgé de 8 ans estimé par le rayon. Image prise à la loupe binoculaire en lumière réfléchie et traitée sous le logiciel ImageJ. Le point vert est l'emplacement théorique du 1^{er} anneau d'arrêt de croissance (Largeur L : 103 μm, soit le 1^{er} anneau théorique à 51.5 μm de part et d'autre du focus théorique, fixé à 0 μm) et les points rouges délimitent les anneaux de croissances annuels.

7.2.1.HYPOTHESE 2 : Test du statut migratoire, comparaison de la zone J et A

La capacité du rayon à différencier les deux habitats « eau douce » et « marin » sera testée au sein de chaque population d'adultes anadromes en comparant les ratios élémentaires moyens entre les zones J et A. A l'instar des otolithes, pouvant discriminer ce changement de milieu par une différence de concentration (en particulier pour le Sa et le Ba), le même résultat est attendu avec les ratios élémentaires du rayon. Ensuite, un contre-test sera effectué sur les mêmes zones pour un groupe d'individus sédentaires. Ces individus résidents, ne partant pas en mer, jouent le rôle de groupe témoin dans la comparaison inter-habitats, car ils devraient indiquer des ratios identiques entre les deux zones. Dans ce cas, des ratios différents entre les deux phénotypes devraient être observés en zone adulte A, un dernier test de comparaison des ratios sera donc réalisé afin de valider ce fait. Ces tests permettront d'accepter ou non l'hypothèse d'une discrimination des phénotypes à partir des rayons.

7.2.2.HYPOTHESE 3 : Test de l'ascendance maternelle : comparaison de la zone V et J

D'abord une analyse comparative des ratios en zone V et J sera menée sur un groupe d'individus dont les données microchimiques apportées par l'otolithe montrent une ascendance maternelle anadrome. Les ratios élémentaires moyens des rayons des deux zones V et J seront comparés à l'échelle globale (toute population confondue). Une différence significative est attendue à l'instar de l'otolithe et en particulier pour le ratio Sr:Ca qui est marqueur d'une ascendance maternelle marine.

Ensuite, la même comparaison sera menée sur un groupe d'individus dont les données microchimiques de l'otolithe montrent une ascendance maternelle résidente. Aucune différence de ratio entre ces deux zones ne devrait exister, à priori pour le Sr, à l'instar des otolithes,

Enfin, des ratios différents entre les deux types d'ascendance maternelle (anadrome et sédentaire) devraient donc être observés au sein de la zone sous influence vitelline V. Un dernier test de comparaison sera donc réalisé afin de valider ce fait. Ces tests permettront d'accepter ou non l'hypothèse d'une influence de l'ascendance maternelle sur la chimie du rayon.

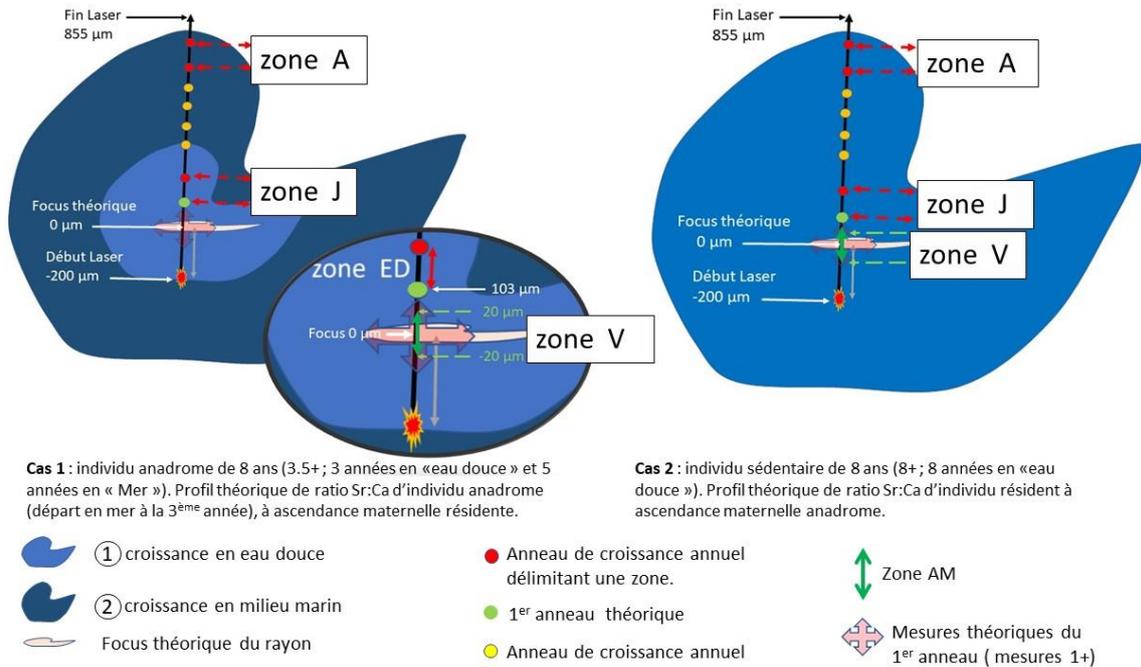


Figure 13 : Schéma théorique du rayon pour la définition du centre du focus (gabarit type 1+), du placement des anneaux de croissance annuels et de la délimitation des zones d'études sur le transect laser.

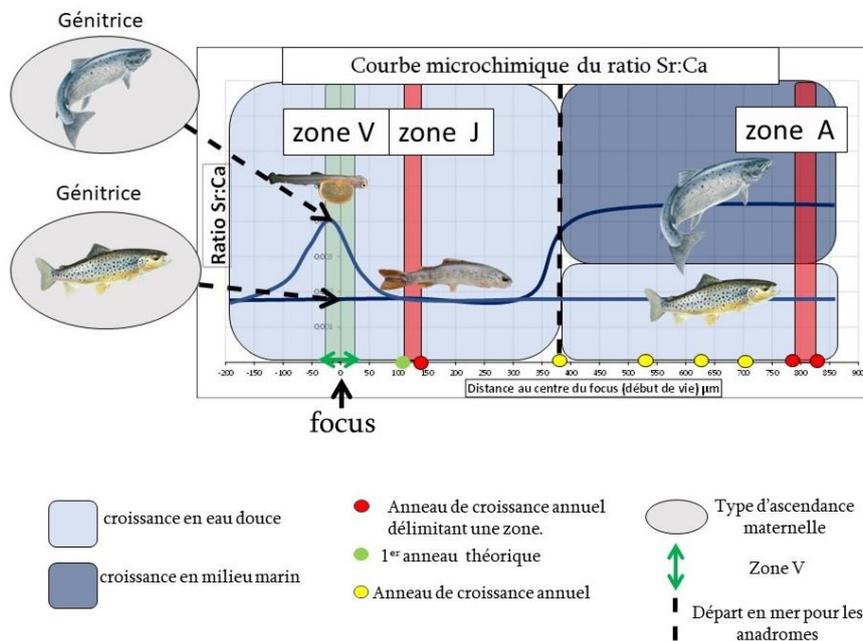


Figure 14 : Schéma théorique des profils microchimiques Sr:Ca observés avec l'otolithe et qui sont attendus pour la chimie du rayon. Les profils chimiques seraient dépendant du phénotype étudié. Ici les profils théoriques des deux phénotypes anadrome et sédentaire sont illustrés.

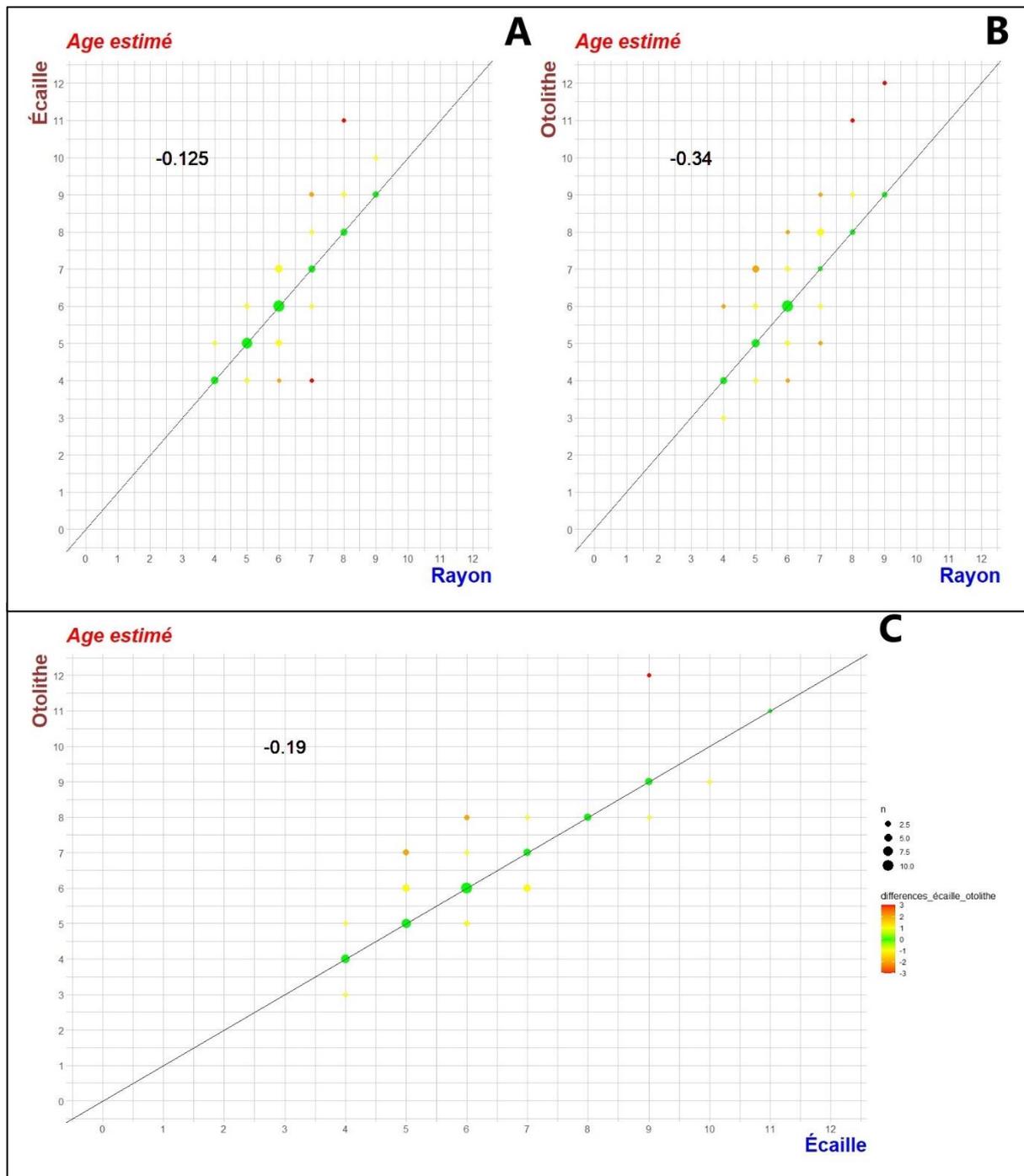


Figure 15 : Comparaison des estimations d'âge réalisées à partir des 3 pièces calcifiées (écailles, rayons de nageoire, otolithes) pour les 65 individus de l'étude. n = nombre d'individus se chevauchant sur l'axe, les valeurs en noirs sont les moyennes des différences inter-estimations. L'estimation à partir des rayons est prise en référence.

IV. RESULTATS

1. HYPOTHESE 1 : Estimation de l'âge

1.1.Comparaison des estimations réalisées entre les rayons et les écailles

Selon le test apparié de Wilcoxon (ou test U de Mann-Whitney), il apparait que les âges déterminés par le rayon ne sont pas significativement différents de ceux estimés par les écailles ($p = 0.219$). Le pourcentage d'estimation correcte est égal à 64 % (écaille en référence). La moyenne des différences entre ces deux estimations est de -0.125 an (Fig.15.B) ce qui traduit une légère sous-estimation de l'âge en utilisant les rayons.

1.2.Comparaison des estimations réalisées entre les rayons et les otolithes

Il apparait que les âges déterminés par le rayon sont significativement différents de ceux estimés par les otolithes ($p = 0.016$). Le pourcentage d'estimations correctes (otolithe comme référence) est égal à 57 %. La moyenne des différences entre ces deux estimations est de - 0.34 an (Fig.15.A), ce qui traduit une sous-estimation de l'âge en utilisant les rayons.

1.3.Comparaison des estimations réalisés entre les écailles et les otolithes

Enfin, les âges déterminés par les otolithes ne sont pas significativement différents de ceux estimés par les écailles ($p = 0.091$). Le pourcentage d'estimation correcte est égal à 64 %, comme pour le rayon. La moyenne de la différence entre ces deux estimations est de - 0.189 an (Fig.15.C). Ceci traduit une sous-estimation de l'âge en utilisant les écailles.

1.4.Bilan sur l'estimation de l'âge

La pièce calcifiée de référence dans l'estimation de l'âge des individus étant l'écaille, les résultats montrent que le rayon est aussi apte que l'otolithe à l'estimation de l'âge. En effet, d'une part aucune différence significative entre les estimations des rayons et des écailles n'apparait et d'autre part les rayons de nageoires et les otolithes possèdent tous deux le même pourcentage d'estimations correctes avec l'écaille. De plus, la moyenne de la différence inter-estimations est inférieur à un an, ce qui vient conforter ces résultats. Ces résultats sur le rayon sont toutefois facilités par le fait que l'âge du poisson était connu, via l'écaille, avant la lecture des rayons.

2. HYPOTHESE 2 : Recherche de traceurs microchimiques de la migration des poissons

2.1.Comparaison intra-populationnelle des données chimiques des individus anadromes entre les zones J et A⁴.

2.1.1.Résultats pour le ratio Sr:Ca

Le ratio Sr:Ca diffère entre les zones J et A pour la population anadrome Manchots ($chi-square = 9.74, p = 0.001$) (Tab.3.A, Fig.16). Le ratio Sr:Ca est également différent entre ces deux zones pour la population anadrome Château bien que la valeur de la p-value du test est proche du seuil 0.05 ($chi-square = 4.59, p = 0.032$) (Tab.3.A, Fig.16). La zone adulte (A) a des ratios Sr:Ca plus élevés que la zone J pour des 2 populations (Tab.4.A.B). Le ratio Sr:Ca n'est pas significativement différent entre les zones J et A pour la population anadrome Norvégienne ($chi-square = 0.34, p = 0.555$) (Tab.3.A, Fig.16). Ces résultats sur le Sr coïncident avec les ratios microchimiques de l'otolithe et est confirmé par les ratios des analyses d'eau (Tab. 5.A).

⁴ Rappel, cette comparaison est réalisée dans le but de déterminer si le rayon est capable de distinguer les séjours marins et donc les habitats utilisés à travers le profil microchimique des trois ratios élémentaires étudiés.

Pour la zone A, le rang des ratios du plus élevé au plus faible pour le Sr est Château, Manchots et Norvégienne (Tab.4.A.B.C). Ces ratios sont relativement homogènes autour de 3.30×10^{-3} , ceci est en adéquation avec les ratios homogènes autour de 23×10^{-3} mesurés dans les eaux marines (Tab.5.A.B.C).

Au contraire, pour la zone J, le rang des ratios du plus élevé au plus faible est Château, Norvégienne et Manchot (Tab.4.A.B.C). Un gradient inverse est observé dans la chimie des eaux douces (Tab.5.A).

2.1.2. Résultats pour le ratio Ba:Ca

Le ratio Ba:Ca diffère entre les zones J et A pour la population anadrome Manchots (*chi-square* = 86.66, $p < .0001$) et anadrome Château (*chi-square* = 24.00, $p < .0001$) (Tab.3.B, Fig.16). Le ratio Ba:Ca n'est pas significativement différent entre les zones J et A pour la population anadrome Norvégienne (*chi-square* = 0.46, $p = 0.495$) (Tab.3.B, Fig.16). La zone J a des ratios plus élevés que la zone A en Ba:Ca pour les populations Château et Manchots (Tab.4.D.E). Ces ratios coïncident avec les ratios retrouvés dans les eaux (Tab.5.B). Seul Norvégienne possède un ratio Ba:Ca non différenciable entre les zones J et A.

Pour la zone A, le rang des ratios du plus élevé au plus faible pour le Ba est Norvégienne, Château et Manchots (Tab.4.D.E.F). La population Norvégienne a un ratio Ba:Ca également plus élevé que les deux autres populations dans les eaux marines (Tab.5.B). Les valeurs des ratios des populations Château et Manchots dans le rayon restent proches.

Au contraire, pour la zone J, le rang des ratios du plus élevé au plus faible est Manchots, Norvégienne et Château (Tab.4.D.E.F). Les eaux douces indiquent elles aussi que la population château possède un ratio Ba:Ca inférieur aux deux autres (Tab.5B).

2.1.3. Résultats pour le ratio Mn:Ca

Le ratio Mn:Ca diffère entre les zones J et A pour chaque population anadrome (Château : *chi-square* = 156.08, $p < .0001$; Manchots : *chi-square* = 133.13, $p < .0001$; Norvégienne : *chi-square* = 67.76, $p < .0001$) (Tab. 3.C, Fig.16). La zone J a des ratios en Mn:Ca plus élevés que la zone A (Tab.4.G.H.I). Ceci est également le cas pour l'analyse des eaux (Tab.5.C).

Pour la zone A, le rang des ratios du plus élevé au plus faible pour le Mn est Manchots, Norvégienne et Château (Tab.4.G.H.I). Ces ratios sont relativement homogènes autour de 3.50×10^{-5} , ceci est en adéquation avec les ratios homogènes autour de 0.036×10^{-3} mesurés dans les eaux marines (Tab.5.C).

Au contraire, pour la zone J, le rang des ratios du plus élevé au plus faible est Château, Manchots et Norvégienne (Tab.4.G.H.I). Les eaux douces indiquent elles aussi que la population château se distingue avec un ratio Mn supérieur aux deux autres (Tab.5.C).

	Rivière	Phénotype	Ratio	Zone	Chi-square	p-value (Kruskal-Wallis)	Significativité
A	CHÂTEAU	Anadrome	Sr:Ca	J vs A	4.59	0.032	*
	MANCHOTS	Anadrome	Sr:Ca	J vs A	9.74	0.001	**
	NORVEGIENNE	Anadrome	Sr:Ca	J vs A	0.34	0.555	ns
B	CHÂTEAU	Anadrome	Ba:Ca	J vs A	24.00	9.623e-07	***
	MANCHOTS	Anadrome	Ba:Ca	J vs A	86.66	< 2.2e-16	***
	NORVEGIENNE	Anadrome	Ba:Ca	J vs A	0.46	0.495	ns
C	CHÂTEAU	Anadrome	Mn:Ca	J vs A	156.08	< 2.2e-16	***
	MANCHOTS	Anadrome	Mn:Ca	J vs A	133.13	< 2.2e-16	***
	NORVEGIENNE	Anadrome	Mn:Ca	J vs A	67.76	< 2.2e-16	***
D	CHÂTEAU	Sédentaire	Sr:Ca	J vs A	2.63	0.104	ns
	MANCHOTS	Sédentaire	Sr:Ca	J vs A	7.41	0.006	**
	NORVEGIENNE	Sédentaire	Sr:Ca	J vs A	0.44	0.506	ns
E	CHÂTEAU	Sédentaire	Ba:Ca	J vs A	8.65	0.003	**
	MANCHOTS	Sédentaire	Ba:Ca	J vs A	0.09	0.757	ns
	NORVEGIENNE	Sédentaire	Ba:Ca	J vs A	4.53	0.033	*
F	CHÂTEAU	Sédentaire	Mn:Ca	J vs A	33.48	7.192e-09	****
	MANCHOTS	Sédentaire	Mn:Ca	J vs A	15.76	7.163e-05	****
	NORVEGIENNE	Sédentaire	Mn:Ca	J vs A	3.82	0.050	ns

Tableau 3 : Tableau des comparaisons inter-zone (« J » et « A ») sur les ratios élémentaires (Sr:Ca, Ba:Ca et Mn:Ca) pour les individus anadromes et résidents des populations Château, Manchots et Norvégienne, déterminés par le test de Kruskal-wallis. Les * représentent le niveau de significativité des résultats, ns : test non-significatif au risque $\alpha = 0.05$.

	Rivière	Zone	Phénotype	Ratio	Moyenne	Écart-type	Min.	Max.
A	CHÂTEAU	J	Anadrome	Sr:Ca	3.16e-03	1.46e-03	0.90e-03	7.76e-03
	CHÂTEAU	A	Anadrome	Sr:Ca	3.62e-03	3.28e-03	1.07e-03	41.80e-03
B	MANCHOTS	J	Anadrome	Sr:Ca	2.82e-03	1.31e-03	0.91e-03	9.02e-03
	MANCHOTS	A	Anadrome	Sr:Ca	3.17e-03	1.58e-03	0.98e-03	15.30e-03
C	NORVEGIENNE	J	Anadrome	Sr:Ca	2.91e-03	1.23e-03	0.76e-03	7.54e-03
	NORVEGIENNE	A	Anadrome	Sr:Ca	3.02e-03	1.36e-03	0.61e-03	10.90e-03
D	CHÂTEAU	J	Anadrome	Ba:Ca	2.50e-06	NA	0.60e-06	12.10e-06
	CHÂTEAU	A	Anadrome	Ba:Ca	2.40e-06	NA	0.40e-06	32.60e-06
E	MANCHOTS	J	Anadrome	Ba:Ca	4.04e-06	3.37e-06	0.63e-06	33.00e-06
	MANCHOTS	A	Anadrome	Ba:Ca	2.17e-06	1.60e-06	0.14e-06	15.00e-06
F	NORVEGIENNE	J	Anadrome	Ba:Ca	2.87e-06	1.82e-06	0.34e-06	11.00e-06
	NORVEGIENNE	A	Anadrome	Ba:Ca	4.90e-06	10.1e-06	0.50e-06	95.50e-06
G	CHÂTEAU	J	Anadrome	Mn:Ca	10.40e-05	8.02e-05	1.87e-05	53.60e-05
	CHÂTEAU	A	Anadrome	Mn:Ca	3.42e-05	3.29e-05	0.73e-05	29.70e-05
H	MANCHOTS	J	Anadrome	Mn:Ca	8.77e-05	8.35e-05	1.09e-05	75.10e-05
	MANCHOTS	A	Anadrome	Mn:Ca	3.61e-05	2.23e-05	0.70e-05	21.50e-05
I	NORVEGIENNE	J	Anadrome	Mn:Ca	7.18e-05	6.00e-05	0.74e-05	31.70e-05
	NORVEGIENNE	A	Anadrome	Mn:Ca	3.58e-05	3.14e-05	0.69e-05	22.40e-05

Tableau 4 : Tableau des paramètres statistiques des ratios élémentaires moyens Sr:Ca, Ba:Ca et Mn:Ca lors de la comparaisons inter-zone (« J » et « A ») sur les individus anadromes des populations Château, Manchots et Norvégienne, déterminés par le test de Kruskal-wallis. Les * représentent le niveau de significativité des résultats, ns : test non-significatif au risque $\alpha = 0.05$.

2.2. Comparaison intra-populationnelle des données chimiques des individus sédentaires entre les zones J et A⁵.

Les individus résidents ne migrant pas en mer, des ratios égaux entre ces deux zones sont attendus. Cependant, ce n'est pas ce qui est observé pour le ratio Mn:Ca. En effet, pour cet élément, les zones J et A des populations sédentaires Château et Manchots sont différentes (Tab.6.F, fig.17). De même, les zones J et A diffèrent dans les ratios Sr:Ca et Ba:Ca, dans certains cas, selon la population sédentaire étudiée (Tab.6.D.E).

2.3. Comparaison intra-populationnelle entre les phénotypes anadrome et sédentaire des données chimiques dans la zone A⁶.

Ce test indique que tous les ratios élémentaires diffèrent entre les phénotypes dans la zone A et ceci à travers tous les populations étudiées (Tab.7). Les individus anadromes possèdent des ratios Sr:Ca supérieurs et des ratios Ba:Ca et Mn:Ca inférieurs à ceux retrouvés chez les individus sédentaires (Annexe 4). Ce même gradient est retrouvé dans la chimie des eaux. Les eaux marines possèdent des ratios plus élevés en Sr:Ca et des ratios Ba:Ca et Mn:Ca inférieurs aux ratios analysés dans les eaux douces (Tab.5).

2.4. BILAN

Une discrimination du statut migrateur semble être possible en zone adulte A grâce à chaque ratio élémentaire, pour chaque population. De plus, notre étude détermine pour les adultes anadromes un ratio Sr:Ca moyen 2 fois supérieur au ratio des individus sédentaires. Puis, un ratio Ba:Ca en moyenne 2.5 fois inférieur. Enfin, le ratio Mn:Ca des individus anadromes est en moyenne 3 fois inférieur à celui des individus sédentaires.

Par ailleurs, seul le ratio Mn:Ca, pourrait être un signal capable de différencier la phase J et A pour chacune des populations d'individus anadromes. Cependant, le contre-test sur les résidents de toutes les populations montre des ratios différents de Manganèse ainsi que de Sr:Ca et Ba:Ca en zone J et A, ce qui n'était pas attendu.

Sites	A			B			C		
	Ratio Sr:Ca (10 ⁻³)			Ratio Ba:Ca (10 ⁻³)			Ratio Mn:Ca(10 ⁻³)		
	Château	Manchots	Norvégienne	Château	Manchots	Norvégienne	Château	Manchots	Norvégienne
Eau douce	3,31	7,05	5,69	0,03	0,05	0,08	6,932	3,504	4,490
MER	23,37	23,31	23,60	0,01	0,02	0,03	0,037	0,004	0,032

Tableau 5 : Tableau des ratios élémentaires moyens Sr:Ca, Ba:Ca et Mn:Ca, inter-zone (« J » et « A ») retrouvés dans les eaux des populations Château, Manchots et Norvégienne.

⁵ Rappel, ce contre-test regroupait cette fois-ci les individus sédentaires par populations mais la comparaison était toujours portée sur les mêmes zones et pour les trois ratios élémentaires étudiés.

⁶ Rappel, l'objectif de cette comparaison est de pouvoir déterminer si la chimie du rayon est apte à distinguer le statut migrateur dans la zone adulte.

	Rivière	Zone	Phénotype	Ratio	Moyenne	Écart-type	Min.	Max.
A	CHATEAU	J	Sédentaire	Sr:Ca	1.35e-03	0.75e-03	0.28e-03	5.22e-03
	CHATEAU	A	Sédentaire	Sr:Ca	1.22e-03	0.71e-03	0.23e-03	6.65e-03
B	MANCHOTS	J	Sédentaire	Sr:Ca	2.79e-03	1.18e-03	1.06e-03	7.02e-03
	MANCHOTS	A	Sédentaire	Sr:Ca	2.32e-03	0.91e-03	0.78e-03	5.35e-03
C	NORVEGIENNE	J	Sédentaire	Sr:Ca	2.03e-03	0.97e-03	0.85e-03	6.77e-03
	NORVEGIENNE	A	Sédentaire	Sr:Ca	1.88e-03	0.80e-03	0.48e-03	4.58e-03
D	CHATEAU	J	Sédentaire	Ba:Ca	2.68e-06	1.76e-06	0.19e-06	13.50e-06
	CHATEAU	A	Sédentaire	Ba:Ca	2.30e-06	NA	0.30e-06	8.70e-06
E	MANCHOTS	J	Sédentaire	Ba:Ca	11.30e-06	7.41e-06	3.58e-06	44.80e-06
	MANCHOTS	A	Sédentaire	Ba:Ca	12.80e-06	9.45e-06	2.21e-06	53.40e-06
F	NORVEGIENNE	J	Sédentaire	Ba:Ca	6.24e-06	3.45e-06	1.30e-06	18.50e-06
	NORVEGIENNE	A	Sédentaire	Ba:Ca	6.06e-06	4.88e-06	0.89e-06	18.80e-06
G	CHATEAU	J	Sédentaire	Mn:Ca	12.40e-05	8.79e-05	1.94e-05	53.20e-05
	CHATEAU	A	Sédentaire	Mn:Ca	7.50e-05	5.47e-05	1.02e-05	42.20e-05
H	MANCHOTS	J	Sédentaire	Mn:Ca	20.90e-05	9.36e-05	5.71e-05	46.90e-05
	MANCHOTS	A	Sédentaire	Mn:Ca	16.80e-05	12.9e-05	4.34e-05	76.70e-05
I	NORVEGIENNE	J	Sédentaire	Mn:Ca	8.28e-05	4.45e-05	2.01e-05	24.40e-05
	NORVEGIENNE	A	Sédentaire	Mn:Ca	7.56e-05	5.20e-05	1.16e-05	22.70e-05

Tableau 6 : Tableau des paramètres statistiques des ratios élémentaires moyens Sr:Ca, Ba:Ca et Mn:Ca lors de la comparaisons inter-zone (« J » et « A ») sur les individus sédentaires des populations Château, Manchots et Norvégienne, déterminés par le test de Kruskal-wallis. Les * représentent le niveau de significativité des résultats, ns : test non-significatif au risque $\alpha = 0.05$.

Rivière	Ratio	Zone	Phénotype	Chi-square	p-value (Kruskal-Wallis)	Significativité
CHATEAU	Sr:Ca	A	Sédentaires vs Anadromes	227.12	< 2.2e-16	****
MANCHOTS	Sr:Ca	A	Sédentaires vs Anadromes	34.22	4.9e-09	****
NORVEGIENNE	Sr:Ca	A	Sédentaires vs Anadromes	70.21	< 2.2e-16	****
CHATEAU	Ba:Ca	A	Sédentaires vs Anadromes	6.63	0.01	*
MANCHOTS	Ba:Ca	A	Sédentaires vs Anadromes	192.78	< 2.2e-16	****
NORVEGIENNE	Ba:Ca	A	Sédentaires vs Anadromes	30.02	4.2e-08	****
CHATEAU	Mn:Ca	A	Sédentaires vs Anadromes	83.29	< 2.2e-16	****
MANCHOTS	Mn:Ca	A	Sédentaires vs Anadromes	189.43	< 2.2e-16	****
NORVEGIENNE	Mn:Ca	A	Sédentaires vs Anadromes	65.88	4.7e-16	****

Tableau 7 : Tableau des comparaisons inter-phénotypes sur les ratios élémentaires (Sr:Ca, Ba:Ca et Mn:Ca) dans la zone « A » pour les individus des populations Château, Manchots et Norvégienne, déterminés par le test de Kruskal-wallis. Les * représentent le niveau de significativité des résultats, ns : test non-significatif au risque $\alpha = 0.05$.

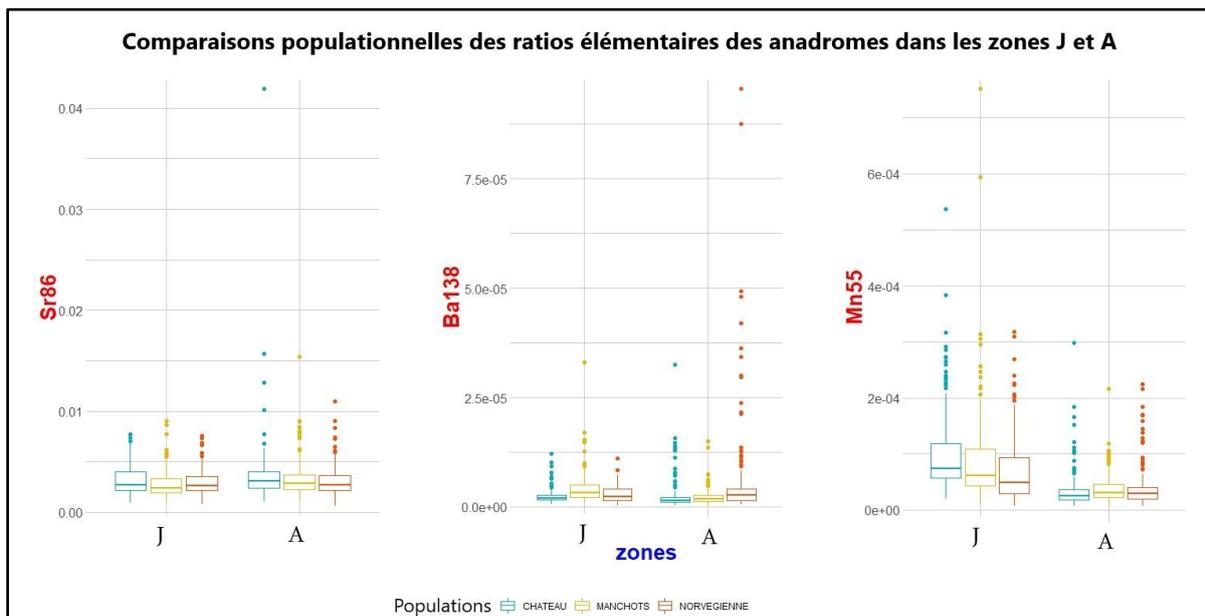


Figure 16 : Boxplot des comparaisons inter-zone (« J » et « A ») pour les ratios Sr:Ca, Ba:Ca et Mn:Ca, pour les individus anadromes des populations Château, Manchots et Norvégienne. La population Château est représentée en Bleu, Manchots est représentée en jaune et la population Norvégienne en orange.

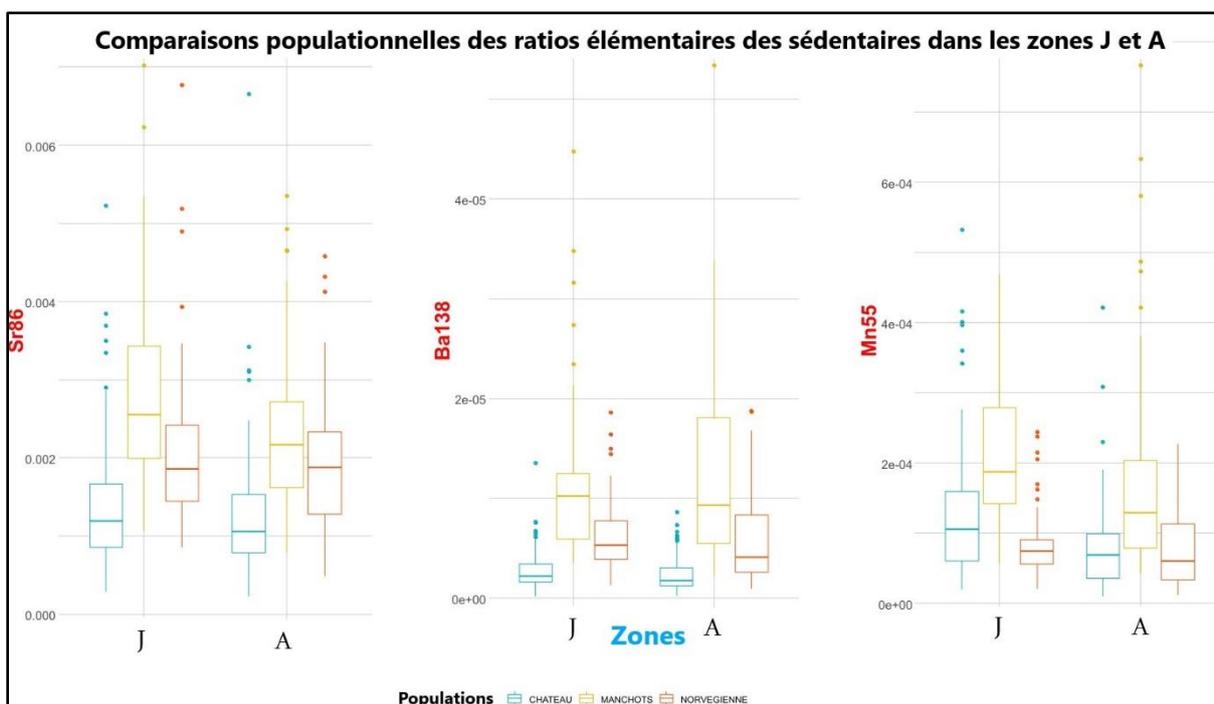


Figure 17 : Boxplot des comparaisons inter-zone (« J » et « A ») pour les ratios Sr:Ca, Ba:Ca et Mn:Ca, pour les individus sédentaires des populations Château, Manchots et Norvégienne. La population Château est représentée en Bleu, Manchots est représentée en jaune et la population Norvégienne en orange.

	Ascendance Maternelle	Ratio	Zone	Chi-square	-value (Kruskal-Wallis)	Significativité
A	Anadrome	Sr:Ca	V vs J	0.40	0.52	ns
	Anadrome	Ba:Ca	V vs J	51.71	6.40e-13	****
	Anadrome	Mn:Ca	V vs J	59.17	1.44e-14	****
B	Résident	Sr:Ca	V vs J	1.57	0.20	ns
	Résident	Ba:Ca	V vs J	91.82	< 2.2e-16	****
	Résident	Mn:Ca	V vs J	185.30	< 2.2e-16	****

Tableau 8 : Tableau des comparaisons inter-zone (« V » et « J ») sur les ratios élémentaires moyens Sr:Ca, Ba:Ca et Mn:Ca pour les individus des rivières Château, Manchots et Norvégienne présentant une ascendante maternelle anadrome ou résidente sur l'otolithe. A et B : phénotype. Les * représentent le niveau de significativité si une différence entre les ratios existe, ns : test non-significatif au risque $\alpha=0.05$.

	Ascendance Maternelle	Ratio	Zone	Moyenne	écart-type	Min.	Max.
A	Anadrome	Ba:Ca	V	4.28e-06	3.13e-06	0.00	2.57e-05
	Anadrome	Ba:Ca	J	2.96e-06	2.01e-06	1.91e-07	1.35e-05
	Anadrome	Mn:Ca	V	1.66e-04	1.59e-04	1.86e-05	1.33e-03
	Anadrome	Mn:Ca	J	9.58e-05	7.70e-05	1.13e-05	5.36e-04
	Anadrome	Sr:Ca	V	2.42e-03	1.64e-03	3.69e-04	1.47e-2
	Anadrome	Sr:Ca	J	2.32e-03	1.43e-03	2.81e-04	7.67e-03
B	Sédentaires	Ba:Ca	V	7.04e-06	6.46e-06	6.08e-07	6.63e-05
	Sédentaires	Ba:Ca	J	4.90e-06	NA	3.00e-07	4.48e-05
	Sédentaires	Mn:Ca	V	1.92e-04	1.42e-04	1.98e-05	1.02e-03
	Sédentaires	Mn:Ca	J	1.08e-04	9.01e-05	7.44e-06	7.51e-04
	Sédentaires	Sr:Ca	V	2.78e-03	1.24e-03	4.84e-04	0.01
	Sédentaires	Sr:Ca	J	2.74e-03	1.27e-03	6.57e-04	9.02e-03

Tableau 9 : Tableau des paramètres statistiques des ratios élémentaires moyens de Sr:Ca, Ba:Ca et Mn:Ca dans la zone sous influence vitelline « V » et en phase de développement des juvéniles en eau douce « J » pour les individus des populations Château, Manchots et Norvégienne présentant une ascendante maternelle anadrome ou résidente sur l'otolithe. A et B : phénotype.

3.Exploration des données microchimiques relatives à l'influence du milieu marin dans la zone d'influence vitelline.

3.1.Comparaison des données microchimiques entre les zones sous influence vitelline (V) et juvénile (J) selon le statut migrateur de la génitrice⁷.

Pour les individus d'ascendance maternelle anadrome, le ratio Ba:Ca diffère entre la zone V et J (*chi-square* = 51.71, *p* <.0001) (Tab.8.A, Fig.18). La zone V possède un ratio Ba:Ca plus élevé que la zone J ($4.28 \times 10^{-6} \pm 2.01 \times 10^{-6}$ versus $2.96 \times 10^{-6} \pm 3.13 \times 10^{-6}$) (Tab.9.A). Le ratio Mn:Ca est également différent entre ces deux zones (*chi-square* = 59.17, *p* <.0001) (Tab.8.A, Fig.18). La zone V possède un ratio Mn:Ca plus élevé que la zone J ($1.66 \times 10^{-4} \pm 1.59 \times 10^{-4}$ versus $9.58 \times 10^{-5} \pm 7.70 \times 10^{-5}$) (Tab.9.A). Quant au ratio Sr:Ca, il n'est pas significativement différent entre ces zones (*chi-square* = 0.40, *p* = 0.52) (Tab.8.A, Fig.18). Ce résultat sur le Sr n'était pas attendu.

Les tests effectués sur les individus porteurs d'une ascendance maternelle résidente donnent les mêmes résultats. Ils indiquent un ratio Ba:Ca différent entre la zone V et J (*chi-square* = 91.82, *p* <.0001) (Tab.8.B, Fig.18) avec une zone V possédant un ratio Ba:Ca plus élevé que la zone J ($7.04 \times 10^{-6} \pm 6.46 \times 10^{-6}$ versus 7.90×10^{-6}) (Tab.9.B) mais aussi un ratio Mn:Ca différent entre ces deux zones (*chi-square* = 185.30, *p* <.0001) (Tab.8.B, Fig.18) avec une zone V possédant un ratio Mn:Ca plus élevé que la zone J ($1.92 \times 10^{-4} \pm 1.42 \times 10^{-4}$ versus $1.08 \times 10^{-4} \pm 9.01 \times 10^{-5}$) (Tab.9.B). Quant au ratio Sr:Ca, il n'est pas non plus significativement différent entre ces deux zones (*chi-square* = 1.57, *p* = 0.20) (Tab.8.B, Fig.18). Ce résultat sur le Sr était attendu.

3.2.Comparaison des données microchimiques de la zone sous influence vitelline (V) selon le statut migrateur de la génitrice⁸

Chaque ratio élémentaire testés s'est révélés distinct entre les deux types d'ascendance maternelle (*p* <.0001, Tab.10).

3.3.Bilan

Les résultats montrent que les types d'ascendances maternelles sont discernables à travers chaque ratio élémentaire dans la zone V sous influence vitelline (Tab.10). Les ratios moyens en Ba:Ca et Mn:Ca permettent d'observer une différenciation des zones V et J indépendamment du type d'ascendance maternelle (*p* <.0001) (Tab. 8.A.B, Fig.18).

⁷ Rappel, l'objectif de cette comparaison est de pouvoir déterminer si la chimie du rayon est apte à distinguer les ascendances maternelles marines des ratios retrouvés lors du développement des juvéniles en eau douce.

⁸ Rappel, l'objectif de cette comparaison est de pouvoir déterminer si la chimie du rayon est apte à distinguer les ascendances maternelles marines dans la zone sous influence vitelline.

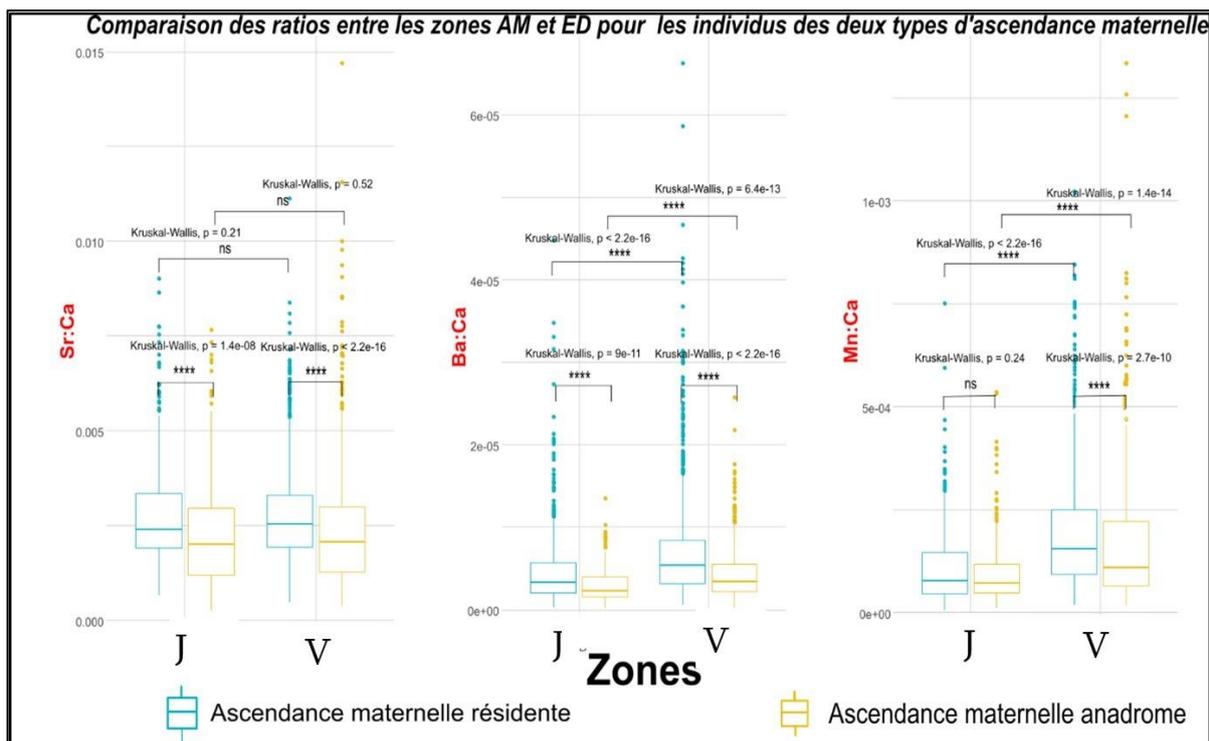


Figure 18 : Boxplot des comparaisons de ratios moyens en Sr:Ca, Ba:Ca et Mn:Ca, inter-zones (« V » et « J ») pour les individus des rivières Manchots, Château et Norvégienne présentant une ascendance maternelle anadrome ou résidente sur l'otolithe. Les * représentent le niveau de significativité si une différence entre les ratios existe, ns : test non-significatif au risque $\alpha=0.05$. L'ascendance maternelle anadrome représentée en bleu, la zone d'ascendance maternelle résidente représentée en jaune.

Acendance Maternelle	Zone	Ratio	Moyenne	Écart-type	Min.	Max.	Chi-square	p-value (Kruskal-Wallis)	Significativité
Anadrome	V	Sr:Ca	2.42e-03	1.64e-03	0.36e-03	14.70e-03	69.74	< 2.2e-16	****
Sédentaire	V	Sr:Ca	2.78e-03	1.24e-03	0.48e-03	11.10e-03			
Anadrome	V	Ba:Ca	4.28e-06	3.13e-06	0.00	25.70e-06	129.02	< 2.2e-16	****
Sédentaire	V	Ba:Ca	7.04e-06	6.46e-06	0.60e-06	66.30e-06			
Anadrome	V	Mn:Ca	1.66e-04	1.59e-04	0.18e-04	13.30e-04	39.87	2.71e-10	****
Sédentaire	V	Mn:Ca	1.92e-04	1.42e-04	0.19e-04	10.20e-04			

Tableau 10 : Tableau des paramètres statistiques des ratios élémentaires moyens de Sr:Ca, Ba:Ca et Mn:Ca dans la zone « V » pour les individus des populations Château, Manchots et Norvégienne présentant une ascendance maternelle anadrome ou résidente sur l'otolithe. Les * représentent le niveau de significativité si une différence entre les ratios existe, ns : test non-significatif au risque $\alpha=0.05$.

V. DISCUSSION

1. ESTIMATION DE L'ÂGE

La détermination de l'âge à partir de la lecture des rayons de nageoires pectorales chez la truite commune est possible, nous validons cette première hypothèse. Cependant, des analyses complémentaires doivent être menées dans le but de confirmer que l'estimation de l'âge à partir du rayon de nageoire est aussi fiable et égale à celle de l'écaille et de l'otolithe.

En effet, d'une part aucune différence significative entre les estimations des rayons et des écailles n'apparaît et d'autre part le rayon de nageoire et l'otolithe possèdent tous deux le même pourcentage d'estimations correctes lors des comparaisons avec l'écaille pour référence (64 %). De plus, les moyennes des différences inter-estimations entre ces trois pièces calcifiées sont inférieures à 6 mois, ce qui vient conforter ces résultats. Cependant, nos lectures prenaient en compte a priori l'âge déterminé auparavant via l'écaille, ce qui a probablement influencé ces résultats plutôt positifs.

Les résultats montrent également une sous-estimation de l'âge lors de l'utilisation du rayon par rapport aux lectures réalisées sur les deux autres pièces calcifiées (écaille et otolithe). Cette sous-estimation, avait déjà été mentionnée par Stolarski et Hartman (2008), lors d'une étude portée sur l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*). Elle est possiblement induite par la chute de la croissance du rayon pectoral après la maturité qui engendrerait une mauvaise distinction des annuli (Den Haas et al., 2013). Par ailleurs, la sous-estimation peut aussi être due au fait que le dernier anneau soit difficile à différencier du derme périphérique. De plus, il n'est pas toujours aisé de déterminer la position des annulis qui précèdent ce dernier anneau. Une solution à ce problème pourrait être de brûler la pièce calcifiée, cela marque la matière organique qui devient opaque et brune. Ce procédé définit mieux les anneaux, mais une étude ultérieure de chimie ne pourra pas être effectuée (Panfili et al., 2002).

D'autre part, bien que les mesures sur les individus 1+ aient été indispensables au positionnement du 1^{er} anneau, il s'agit d'un placement théorique et non pas issu d'une observation réelle sur chaque pièce calcifiée individuelle. Le positionnement du 1^{er} anneau est donc encore à préciser à l'échelle individuelle. La possibilité d'une erreur dans l'identification du premier anneau peut aussi porter à une sous-estimation de l'âge mais également à un biais dans la définition des zones vitelline, juvénile et adulte que nous avons définies (Beamish, 1973).

Enfin, si l'otolithe est pris comme référence pour l'âge, l'étude montre que l'écaille présente des résultats similaires alors que le rayon donne une différence significative de -0.34 an (4 mois). Bien que cette erreur d'ageage apparaît faible au niveau populationnel, le rayon est moins propice à une estimation fiable de l'âge au niveau individuel en comparaison aux 2 autres pièces. En effet, dans le cas d'un ageage différent, l'écart au niveau individuel sera au minimum d'1 an.

Les nageoires pectorales échantillonnées sur le terrain n'étaient pas toutes complètes ce qui pourrait constituer un autre biais produisant ces sous-estimations. Certaines d'entre elles n'étaient qu'une section des trois premiers rayons ou étaient coupées à un niveau plus distal, éloignées de l'articulation. Ceci a produit des rayons difficilement lisibles notamment pour la détermination des marques annuelles sur les rayons de certains individus sédentaires. En effet, selon Koch et al., (2008), la localisation des sections affecte fortement la lecture et l'estimation de l'âge. Une erreur dans le positionnement des anneaux pourrait engendrer un âge incertain, un mauvais positionnement des zones d'études et par conséquent une mauvaise interprétation des signaux chimiques « types » dans cette étude.

Les estimations d'âge ont été réalisées par un seul lecteur alors que Rude et al., (2013), déterminent à 25 % le pourcentage moyen d'erreur inter-lecteurs dans l'estimation de l'âge lors

de l'utilisation du rayon et de 20 % lors de l'utilisation de l'otolithe. Par conséquent, un biais subjectif est présent dans l'étude car, bien que formé par mon encadrant j'ai été le seul à lire l'ensemble des rayons. Cependant, ces auteurs démontrent que l'estimation à partir des rayons n'est pas différente de celles réalisées à partir des otolithes et que l'accord dans les estimations inter-lecteurs et entre les âges déterminés par ces deux pièces est élevé.

Quelques faits viennent atténuer l'intérêt que l'on pourrait porter au rayon. D'une part la phase de préparation des pièces est nettement plus chronophage que la scalimétrie (Stolarski et Hartman, 2008). De plus, la scalimétrie, sauf dans le cas d'une écaille régénérée, peut toujours déterminer un âge et peut déceler les migrations. Au contraire, de nombreuses incertitudes sur le potentiel des rayons dans l'estimation des individus âgés de moins de 4 ans persistent. Même dans les catégories d'âges supérieures, la possibilité de lire l'âge dépend du niveau de coupe et la pièce peut s'avérer parfois illisible, même en cas de bon échantillonnage. Enfin, à première vue, il ne semblerait pas possible de déceler les migrations marines à la lecture.

2. RECHERCHE DE TRACEURS MICROCHIMIQUES DE LA MIGRATION DES POISSONS

L'hypothèse 2 d'un effet du phénotype anadrome sur la variation des ratios élémentaires au sein de la zone adulte seule est validée. Par contre, cet effet phénotype n'est pas validé pour la comparaison des zones J et A.

Les ratios Sr:Ca, Ba:Ca et Mn:Ca, permettent à l'échelle populationnelle de discerner le statut migrateur simplement grâce à la comparaison des données microchimiques dans la zone adulte (A). En effet, l'analyse élémentaire de cette zone de croissance indique une différence entre le phénotype anadrome et résident pour tous les ratios élémentaires. Ceci, pourrait permettre une distinction du statut migrateur à l'échelle individuelle à partir de la chimie dans une majeure partie des cas.

Les analyses menées sur la différenciation des zones juvénile et adulte ne sont pas satisfaisantes car les anadromes mais aussi les sédentaires montrent une différenciation entre ces deux zones. En effet, le ratio Mn:Ca est capable de différencier la zone juvénile de la zone adulte pour chacune des populations anadromes mais c'est aussi le cas pour les sédentaires sauf pour la population Norvégienne. Cette variation ne peut donc pas être interprétée comme le passage des individus anadromes dans l'environnement marin. Sachant que, l'intégration du Manganèse est indicateur de la croissance, la diminution du ratio Mn:Ca des individus sédentaires et anadromes pourrait être due à la réduction de la croissance avec l'âge, après maturité. De plus, le Manganèse est aussi un proxy de l'hypoxie, ce qui rend son interprétation complexe (Limburg et al., 2014 ; Heimbrand et al., 2020). La comparaison des zones juvénile et adulte pour le Ba et le Sr qui sont de bons indicateurs de la migration sur l'otolithe, montre que ces ratios ne sont pas de bon indicateur à partir du rayon. En effet, il n'y a pas de pattern général observé. Le Barium serait discriminant pour la population Manchot car il n'y a pas de différenciation des zones pour les résidents mais ceux-ci montrent une différence sur la population Château. Au contraire, le Sr serait discriminant pour la population Château car les résidents ne montrent pas de différence entre zone juvénile et adulte mais ceci n'est pas vrai pour la population Manchot où une différence apparaît. Enfin, la population Norvégienne ne montre de variation que pour le Ba chez les résidents, ce qui est un pattern différent des autres populations car les ratios des anadromes ne varient pas entre zones. Pour cette dernière population, les eaux douces sont chargées en Sr (Tab.3.A) et les signaux otolithiques des zones juvénile et adulte sont indifférenciables, il est donc probable que le même phénomène puisse se produire dans le cas du rayon.

Hormis pour la rivière Norvégienne qui présente des eaux chargées en Strontium et Barium, ce qui peut créer des résultats particuliers, les ratios en zone juvénile et adulte des individus

anadromes des deux autres populations présentent des valeurs Sr:Ca supérieures en mer et des valeurs Ba:Ca supérieures en eau douce. Ceci, témoigne de la faculté du rayon à incorporer les éléments traces de l'environnement en correspondance avec les variations de l'eau. **Pour conclure, les ratios analysés dans la zone adulte des résidents sont très distincts de ceux des individus anadromes bien que les deux zones juvénile et adulte chez les résidents indiquent aussi une différenciation chimique. Ce résultat permet de différencier les phénotypes anadromes et sédentaires grâce à la chimie du rayon, quel que soit l'élément trace ou la population.** Toutefois, l'étude montre peu de variabilité spatiale et temporelle d'échantillonnage ce qui induit des résultats fragiles. Une étude intégrant plus de variabilité pourrait les confirmer. En effet, les échantillonnages concernent seulement les années 2010 et 2011 et rassemble uniquement 65 individus de 3 populations.

3. EXPLORATION DES DONNEES MICROCHIMIQUES DANS LA ZONE D'INFLUENCE VITELLINE

L'hypothèse 3 d'un effet du phénotype anadrome de la génitrice sur la variation des ratios élémentaires au sein de la zone vitelline seule est validée. Par contre, cet effet phénotype n'est pas validé pour la comparaison des zones sous influence vitelline V et juvénile J.

Les ratios élémentaires dans la zone sous influence vitelline apparaissent comme dépendant du type d'ascendance maternelle à l'échelle des populations. Mais les ratios observés pour les individus d'ascendance anadrome sont en moyenne seulement 1,3 fois supérieurs à l'ascendance résidente, pour l'ensemble des éléments, ce qui pourrait rendre difficile la différenciation à l'échelle individuelle. Cette réponse physiologique différente selon le type d'ascendance pourrait être un héritage transmis par la génitrice. En effet, la quantité et la qualité des réserves vitellines produites par les génitrices marines et résidentes pourraient varier et avoir un effet sur le taux métabolique des descendants et donc leur taux de croissance (Forseth et al., 1999 ; Goodwin et al., 2016). Cependant, le manque de publications portées sur la physiologie, en particulier pour l'intégration du Manganèse qui est un élément qui subit une forte régulation physiologique, durant la formation de la nageoire, ne nous permet pas d'aller plus loin dans l'interprétation (Heimbrand et al., 2020). Comme énoncé précédemment, son interprétation est complexe (Limburg et al., 2014 ; Heimbrand et al., 2020).

Enfin, alors qu'un effet populationnel a été révélé dans l'analyse des données chimiques de la zone adulte, l'étude de la zone sous influence vitelline n'a pas considéré l'effet populationnel. Une analyse de cet effet pourrait entraîner des résultats différents sur la discrimination des deux types d'ascendance.

Malgré ce résultat en zone sous influence vitelline, les analyses portées sur la différenciation entre cette zone et la zone juvénile, ne sont pas satisfaisantes pour l'élément Sr. En effet, le Sr qui est un bon indicateur de l'ascendance anadrome sur l'otolithe, ne varie pas sur le rayon entre ces zones, quel que soit l'ascendance. Pour la comparaison des ratios de Ba:Ca et Mn:Ca de ces zones, l'analyse montre des différences significatives, quelle que soit l'ascendance maternelle, pour toutes les populations. Ainsi, les ratios Mn:Ca et Ba:Ca ne permettent pas non plus d'affirmer qu'une ascendance maternelle anadrome existe puisque des variations fortes existent aussi pour les poissons à ascendance maternelle résidente. Ce résultat suggère plutôt la présence d'une zone sous influence vitelline bien différenciée chimiquement de celle de la croissance juvénile en eau douce. Ceci peut être en relation avec l'apport nutritif du vitellus (en zone V) en opposition à la nutrition autonome en zone J. Un potentiel effet du vitellus est présent sur les données microchimiques pour les éléments Ba et Mn dans la zone du début de vie de l'individu.

VI. CONCLUSION

Aujourd'hui de plus en plus d'études portant sur l'analyse des éléments traces utilisent la microchimie des rayons de nageoires pour identifier des habitats ou des migrations marines et pour réattribuer des poissons à leurs rivières natales. L'utilisation de cette pièce se développe par souci éthique afin de trouver une alternative non-létale à l'utilisation des otolithes. Les informations sur la capacité des rayons de nageoires à renseigner d'une part l'âge et d'autre part, à travers la chimie, les habitats utilisés, sont manquantes, notamment dans le cas de la truite commune. Dans notre étude, on a pu montrer que l'âge peut être estimé efficacement mais en contrepartie d'une préparation chronophage. Une estimation similaire à l'âge estimé par l'écaille a été démontrée, ce qui est un résultat positif nuancé par l'apparition de nombreux biais et difficultés. Lors de l'analyse de la chimie du rayon, les ratios Sr:Ca, Ba:Ca et Mn:Ca se sont révélés efficaces dans la différenciation du statut migrateur dans une zone qui correspond à la croissance des adultes, en mer pour les anadromes et en eau douce pour les sédentaires. Ces analyses ont également montré qu'il serait possible à travers ces trois ratios élémentaires de définir le statut migrateur des génitrices dans la zone du rayon sous influence vitelline. Néanmoins, les analyses statistiques se basent sur une série de données chimiques multiélémentaires localisés sur les profils chimiques et ne prennent pas en compte une potentielle variation temporelle du signal. De plus, les facteurs populationnels comme la variabilité inter-populationnelle des ratios ne sont pas pris en compte ici pourraient faire varier les résultats de l'effet de l'influence maternelle.

En perspective, une étude avec un échantillonnage des individus par rivière et par cohorte plus complet pourrait permettre de réattribuer des individus à leurs origines géographiques natales. Une analyse a déjà été menée en prémisses à une future exploitation des données et a indiqué que le ratio moyen de Ba:Ca est le seul capable de différencier simultanément chacune des populations étudiées dans la zone du rayon correspondant au stade de développement des juvéniles en eau douce (Annexe 7). Cependant, dans l'étude future, il s'agirait d'incrémenter un modèle additif mixte généralisé (GAMM) permettant d'intégrer les effets populationnel, phénotypique et l'effet de l'influence maternelle pour comparer les individus sur la totalité du transect microchimique. L'effet de l'influence maternelle dans la zone de développement des juvéniles a également été prétraité lors d'une analyse complémentaire. Cette analyse a montré que les ratios Sr:Ca et Ba:Ca différaient dans cette zone, selon le type d'ascendance maternelle, témoignant ainsi d'une influence de l'ascendance maternelle sur l'incorporation des éléments dans la phase juvénile du poisson (Annexe 9). Dans le cas d'une discrimination efficace par les ratios élémentaires avec ce modèle GAMM, une réattribution basée sur un cocktail élémentaire pourrait être réalisée. Ensuite, une analyse discriminante des populations avec l'intégration de co-variables prenant en compte l'influence maternelle et le phénotype pourrait être effectuée pour estimer le pourcentage de classification réussi. Une quantification de l'erreur d'attribution d'origine géographique des juvéniles pourrait alors permettre de juger de l'efficacité du rayon pour la réattribution d'origines natales à partir de l'analyse des éléments traces. Quant à la lecture d'âge, un seul lecteur entraîne un biais subjectif, une analyse plus approfondie consisterait à déterminer la variabilité inter-lecteurs et à répéter celle-ci à des intervalles de temps donnés. Enfin, les profils microchimiques Mn:Ca ont révélé des pics de Mn pour la plupart des individus aux niveaux des anneaux annuels déterminés à la lecture. Le Mn étant un indicateur de la croissance, une piste s'ouvre ici dans la possibilité de compléter l'âgeage scalimétrique et otolithométrique du poisson avec les profils microchimiques du Manganèse.

VII. REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- Allen P.J., Hobbs J.A., Cech J.J. JR., Van Eenennaam J.P., et Doroshov S.I. 2009. Using Trace Elements in Pectoral Fin Rays to Assess Life History Movements in Sturgeon: Estimating Age at Initial Seawater Entry in Klamath River Green Sturgeon. Transactions of the American Fisheries Society DOI: 10.1577/T08-061.1
- Arnold G. P., Webb P. W., et Holford B.H. 1991. The role of the pectoral fins in station-holding of Atlantic salmon parr (*Salmo salar* L.). Journal of Experimental Biology 156:625–629.
- Aymes J.C., VIGNON M., BEALL E., et al., 2016. Age validation of the Kerguelen Islands brown trout, *Salmo trutta* L., and selection of the otolith optimal zone for investigating chronological data series. Fisheries Research. Vol. 176, p. 22-29.
- Baglinière J.L., Leclerc G., Richard A. 1986. COMPARAISON ENTRE L'AGE ET LA CROISSANCE DÉTERMINÉS PAR SCALIMÉTRIE ET OTOLIMÉTRIE CHEZ LA TRUITE DE MER (*SALMO TRUTTA* L.) m Bull. Fr.
- Baglinière J.L., 2020. Guide pour l'interprétation des écailles et l'estimation de l'âge chez la truite commune (*salmo trutta*) dans les populations françaises. Février 2020
- Beall E., et Davaine P. 1988. Analyse scalimétrique de la truite de mer (*Salmo trutta* L.) : formation des anneaux et critères d'identification chez les individus sédentaires et migrateurs d'une même population acclimatée aux îles Kerguelen (TAAF). Aquatic Living Resources 1, 3-16.
- Beamish R.J. 1981. Use of Fin-Ray Sections to Age Walleye Pollock, Pacific Cod, and Albacore, and the Importance of this Method Department of Fisheries and Oceans, Resource Services Branch Pacific Biological Station, Nanaimo, British Columbia V9R 5K6, Transactions of the American Fisheries Society 110:287-299, 1981.
- Beamish R.J., et Chilton D. 1977. Age determination of lingcod (*Ophiodon elongatus*) using dorsal fin rays and scales. Journal of the Fisheries Research Board of Canada 34: 1305-1313.
- Beamish, R. J. 1973. Determination of age and growth of populations of the white sucker (*Catostomus commersoni*) exhibiting a wide range in size at maturity. Journal of the Fisheries Research Board of Canada 30:607–616.
- Campana S.E., 1999. Chemistry and composition of fish otoliths: pathways, mechanisms and applications. Marine Ecology Progress Series. Vol. 188, p. 263-297.
- Clarke A.D., Lewis A., Telmer K.H., et Shrimpton J.M. 2007. Life history and age at maturity of an anadromous smelt, the eulachon *Thaleichthys pacificus*. Journal of Fish Biology. doi:10.1111/j.1095-8649.2007.01618.x
- Coble D.W. 1967. Effects of fin clipping on mortality and growth of yellow perch with a review of similar investigations. Journal of Wildlife Management 31:173–180.
- Daverat F. et Martin J. 2016. Microchemical and sclerochronological analyses used to infer fish migration. chapter 9 Book.
- Deelder C.L., et Villiansee J.J. 1973. Age determination in fresh-water teleosts, based on annular structures in fin-rays. Aquaculturr: 1: 365-371.
- Den Haas T.C., Bouvier L.D., et Mandrak N.E. 2013. Identifying and Comparing Annuli across Calcified Structures in Shorthead Redhorse (*Moxostoma macrolepidotum*). Can. Manuscr. Rep. Fish. Aquat. Sci. 3023: iv + 10 p.
- Escaffre A.M., Bergot P. 1990. Résorption du vitellus chez les alevins de truite commune (*Salmo Trutta*.) gardés a jeun ou nourris .I.N.R.A. Station d'Hydrobiologie Unité Elevage Larvaire 64310 Saint-Pée-sur-Nivelle, France.
- Forseth T., Nesje, T.F., et Jonsson B. 1999. Juvenile migration in brown trout: a consequence of energetic state. Journal of Animal Ecology. Vol. 68, no 4, p. 783-793.
- Fry D.H., Jr. 1961. Some problems in the marking of salmonids. Pacific Marine Fisheries Commission Bulletin 5:77–83.
- Gillanders B.M. 2005. Otolith chemistry to determine movements of diadromous and freshwater fish. Aquatic Living Resources. Vol. 18, no 3, p. 291-300.

- Goodwin, Jill C.A., ANDREW KING R., IWAN JONES J., et al., 2016. A small number of anadromous females drive reproduction in a brown trout (*Salmo trutta*) population in an English chalk stream. *Freshwater Biology*. Vol. 61, no 7, p. 1075-1089.
- Heckel IV J.W., Quist M.C., Watkins C.J., et al., 2020. Life history structure of westslope cutthroat trout: Inferences from otolith microchemistry. *Fisheries Research*. Vol. 222, p. 105416.
- Heimbrand Y., Limburg K.E., Hüsey K., Casini M., Sjöberg R., Palmén Bratt A.M., Levinsky S.E., Karpushevskaia A., Radtke K., Öhlund J.2020. Seeking the true time: Exploring otolith chemistry as an age-determination tool. DOI: 10.1111/jfb.14422
- K. T. Smith & G. W. Whitley (2010) Fin Ray Chemistry as a Potential Natural Tag for Smallmouth Bass in Northern Illinois Rivers, *Journal of Freshwater Ecology*, 25:4, 627-635, DOI: 10.1080/02705060.2010.9664412
- Kalish J.M., 1990. Use of otolith microchemistry to distinguish the progeny of sympatric anadromous and non-anadromous salmonids. *Fish. Bull. US*. Vol. 88, p. 657-666.
- Kamler E.2005. Parent–egg–progeny relationships in teleost fishes: an energetics perspective. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*. Vol. 15, no 4, p. 399-421.
- Kang ., Sukyung ., Kim ., Suam ., Telmer K., et al., 2014. Stock identification and life history interpretation using trace element signatures in salmon otoliths. *Ocean Science Journal*. Vol. 49, no 3, p. 201-210.
- Kerr L.A, Campana S.E. 2014. Chemical Composition of Fish Hard Parts as a Natural Marker of Fish Stocks. University of Massachusetts, School for Marine Science and Technology, New Bedford, MA, USA; Gulf of Maine Research Institute, Portland, ME, USA. Population Ecology Division, Bedford Institute of Oceanography, Dartmouth, Nova Scotia, Canada.
- Koch J.D. et Quist M.C.2007. A Technique for Preparing Fin Rays and Spines for Age and Growth Analysis. Department of Natural Resource Ecology and Management, Iowa State University, 339 Science II, Ames, Iowa 50011, USANorth American Journal of Fisheries Management 27:782–784, DOI: 10.1577/M06-224.1
- Koch J.D., Schreck W.J. et Quist M.C.2008.Standardised removal and sectioning locations for shovelnose sturgeon fin rays.Department of Natural Resource Ecology and Management, Iowa State University, Ames, IA, USA, 15,139-145.
- Labonne J., Aymes J.C., Beall E., Chat J., Dopico-Rodriguez E.D., Garcia Vazquez E., Gaudin P., Guéraud F., Hendry A.P., Horreo-Escandon J.L., Huteau D., Jarry M., Kaeuffer R., Lecomte F., Manicki A., Rives J., Roussel J.M., Tremblay J., Vignon M., Zhou M. 2013. Ecologie évolutive de la colonisation des Iles Kerguelen par les salmonidés. Rapport de fin de programme IPEV SALMEVOL-1041, 77p. +annexes.
- Limburg K.E., Walther B.D., Lu Z., Jackman G., Mohan J., Walther Y., Nissling A., Weber P.K., Schmitt A.K. 2014. In search of the dead zone: Use of otoliths for tracking fish exposure to hypoxia.
- McNeil F. I., et Crossman E. J. 1979. Fin clips in the evaluation of stocking programs for muskellunge, *Esox masquinongy*. *Transactions of the American Fisheries Society* 108:335–343.
- Mears H. C., et Hatch R. W. 1976. Overwinter survival of fingerling brook trout with single and multiple fin clips. *Transactions of the American Fisheries Society* 105:669– 674.
- Meunier F.J., 1992. L'estimation de l'âge individuel chez les chondrychtyens : revue bibliographique des problèmes méthodologiques. In : « Tissus durs et âge individuel des vertébrés ». Colloque national, Bondy , France, 4-6 mars 1991. Baglinière J.L., Castanet J., Conand F., Meunier F.J. (eds). Colloques et Séminaires ORSTOM-INRA : 281-297.
- Mills K.H., et Beamish R.J. 1980.Comparison of fin-ray and scale age determination for lake whitefish (*Coregonus clupeaformis*) and their implications for estimates of growth and annual survival.
- Nicola S. J., et Cordone A. J. 1973. Effects of fin removal on survival and growth of rainbow trout (*Salmo gairdneri*) in a natural environment. *Transactions of the American Fisheries Society* 102:753–758.
- Ombredane D., et Baglinière J.L.1992.Les écailles et leurs utilisations en écologie halieutique. Dans *Tissus durs et âge individuel des vertébrés*. Colloque national, Bondy. Colloques et Séminaires ORSTOM-INRA, Paris. p, 1992, pp. 151–192.

Panfili, J., Pontual ; (de), Troadec H ;? Wright P.J (éd), 2002. Manuel de sclérochronologie des poissons. Coédition Ifremer-IRD, 464p.

Perrier C. 2011. Coupling genetic and otolith trace element analyses to identify river-born fish with hatchery pedigrees in stocked Atlantic salmon (*Salmo salar*) populations. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*.

Reid S.M et Glass W.R. 2014. Precision and comparability of Black Redhorse (*Moxostoma duquesnei*) age estimates using scales, pectoral fin rays, and opercle bones. Report number: 3034 Affiliation: Canadian Manuscript Report of Fisheries and Aquatic Science

Rogissart H., 2020. Étude de l'influence maternelle sur les signaux microchimiques de l'otolithe de truite commune (*Salmo trutta*) aux îles Kerguelen. INRAE/UPPA - UMR 1224 ECOBIOP Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement.

Rude N.P., Smith, K.T., et Whitley G.W. 2014. Identification of stocked muskellunge and potential for distinguishing hatchery-origin and wild fish using pelvic fin ray microchemistry. *Fisheries Management and Ecology* 21, 312–321. doi: 10.1111/fme.12081

Sharpe C.S., Thompson D.A., Schreck C.B., et Blankenship H.L. 1998. Effects of Routine Handling and Tagging Procedures on Physiological Stress Responses in Juvenile Chinook Salmon. *The Progressive Fish-Culturist* 60:81–87.

Shirvell C. S. 1981. Validity of fin ray ageing for brown trout. *Journal of Fish Biology* 18:377–383.

Simkiss K., 1974. Calcium metabolism of fish in relation to aging. Pages 1–12 in T. B. Bagenal, editor. *Ageing of fish*. Gresham Press, Old Working, UK.

Sneed K.E. 1951. A method for calculating the growth of channel catfish, *Ictalurus lacustris punctatus*. *Transactions of the American Fisheries Society* 80, 174–183.

Stolarski J.T., et Hartman K.J. 2008. An Evaluation of the Precision of Fin Ray, Otolith, and Scale Age Determinations for Brook Trout Wildlife and Fisheries Resources, West Virginia University, Morgantown, West Virginia 26506-6125, USA

Sturrock A.M., Trueman C.N., Darnaude A.M., Hunter E. 2012. Can otolith elemental chemistry retrospectively track migrations in fully marine fishes?. *J Fish Biol* 81:766–795.

Sweeney J.K., Willmes M., Sellheim K., Lewis L., Hobb, J.A., Fangué N.A., Merz, Joseph E. 2020. Ontogenetic patterns in the calcification and element incorporation in fin rays of age-0 White Sturgeon. *ENVIRONMENTAL BIOLOGY OF FISHES* Volume 103 Issue 11 Page 1401-1418 DOI10.1007/s10641-020-01031-1 Published NOV 2020

Tabouret H. 2009. Recherche des marqueurs d'exposition aux contaminants et de fréquentation des habitats chez l'anguille *anguilla anguilla* de l'estuaire de l'Adour : De la réponse moléculaire à la microchimie de l'otolithe.

Thomas, Oliver R.B., Katherine V., Jenkins, Gregory P., et al., 2020. Spatio-temporal resolution of spawning and larval nursery habitats using otolith microchemistry is element dependent. *Marine Ecology Progress Series*. Vol. 636, p. 169-187.

Tzadik O.E., Jones D.L., Peebles E.B., Koenig C.C., et Stallings C.D.(b). The Effects of Spatial Scale on Assigning Nursery Habitats in Atlantic Goliath Groupers (*Epinephelus itajara*) Using Non-lethal Analyses of Fin Rays (*Epinephelus itajara*).

Tzadik O.E., Curtis J.S., Granneman J.E., Kurth B.N., Pusack T.J., Wallace A.A., Hollander D.J., Peebles E.B., Stallings C.D. 2017.(a). A Chemical archives in fishes beyond otoliths: A review on the use of other body parts as chronological recorders of microchemical constituents for expanding interpretations of environmental, ecological, and life-history changes. College of Marine Science, University of South Florida, Saint Petersburg, Florida.

Veinott ., Geoff ., Westley ., Peter A.H., Purchase ., Craig F., et al., 2014. Experimental evidence simultaneously confirms and contests assumptions implicit to otolith microchemistry research. Gillanders, Bronwyn (éd.), *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. Vol. 71, no 3, p. 356-365.

Vignon M., Bareille G., Tabouret H., Semperez R. 2020. Première étude comparative de la microchimie des otolithes et des écailles pour déterminer l'origine spatiale des populations de saumon atlantique: Rapport final.

OFB; INRAE; Agrocampus Ouest; Université de Pau et des Pays de l'Adour; Pôle Gestion des Migrateurs Amphihalins dans leur Environnement. 2020, 26 p. ffhal03104019f

Yasuhiko T., Kohno H., et Hara S.1986. Early development of fin-supports and fin-rays in the Milkfish *Chanos chanos*. Japanese Journal of Ichthyology, vol. 32, No.4, page. 413-420.

Zymonas N.D., et McMahon T.E. 2006. Effect of Pelvic Fin Ray Removal on Survival and Growth of Bull Trout. Ecology Department, Fish and Wildlife Program, Montana State University, Bozeman, Montana 59717, USA, North American Journal of Fisheries Management · November 2006.

VIII. ANNEXES

Annexe 1 : Méthode et illustration de l'inclusion des rayons de nageoires dont la partie distale et proximale ne sont pas différenciables.

Pour les rayons incomplets et dont l'orientation à l'articulation était non visible à l'œil nu, les inclusions ont été réalisées identiquement à la méthode d'inclusion des otolithes (J. Panfili, H. de Pontual, H. Troadec et P. J. Wright. 2002) (illustration). Un agent de démoulage a été appliqué sur les pourtours d'un moule rectangulaire en silicone (SPI® 2442). Ensuite une première couche, fine, de résine époxy a été coulée au fond de ce moule. Cette couche, une fois polymérisée, a servi de support au rayon. Le rayon a été placé horizontalement puis a été enrobé d'une seconde couche de résine. Après avoir contrôlé la polymérisation, les moules rectangulaires en silicone, ont permis un démoulage simple.

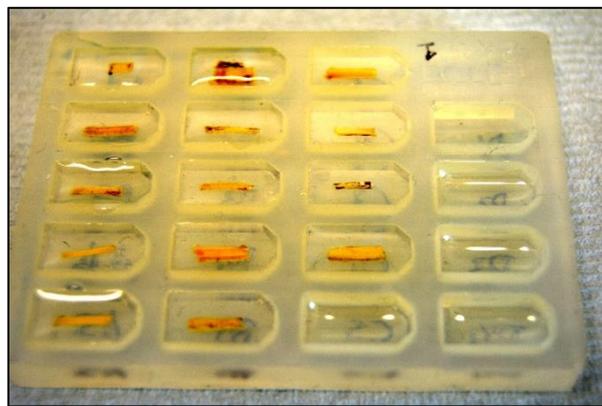
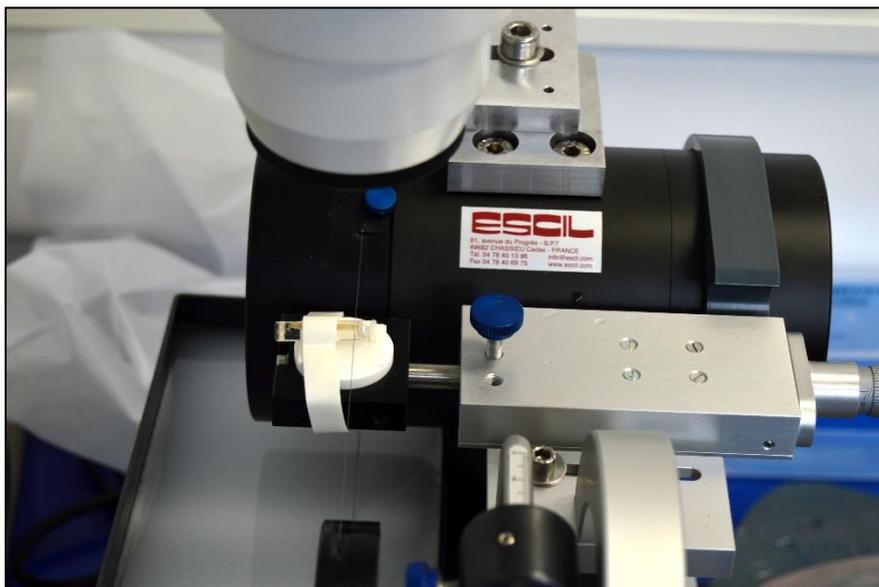


Illustration de l'inclusion des rayons de nageoires dont la partie distale et proximale ne sont pas différenciables.

Annexe 2 : Découpe de sections transversales dans les inclusions de rayons (scie Escil®, SMZ-143 series).



Annexe 3 : Méthode d'analyse des éléments traces par LA-ICP-MS :

Les concentrations élémentaires ont été analysées par un système d'ablation laser couplé à un spectromètre de masse à plasma induit (LA-ICP-MS, voir schéma) de la plateforme PAMAL (plateforme d'Analyse des Métaux Traces par Ablation Laser) de l'IPREM (Institut des Sciences Analytiques et de la physico-Chimie pour l'Environnement et les Matériaux, Pau). Cette technique consiste à échantillonner une fine quantité de matière de la surface d'un solide grâce à un laser et à la transférer vers le spectromètre (Agilent 8900 ICP-MS Triple Quad) pour en déterminer la composition en ions d'intérêt. Le laser utilisé est un laser femtoseconde (IR 1030 nm, Alfamet) équipé d'une caméra qui permet de régler précisément la zone de tir à quelques microns près. La spécificité de ce laser est sa cadence de tir qui est de l'ordre du femto seconde (360 fs), elle permet de réaliser un micro-échantillonnage des solides avec une haute résolution spatiale.

Une fois échantillonnée, la matière est transportée par un flux d'hélium jusqu'au spectromètre de masse. Après une phase de mise au point, nous avons défini les conditions optimales d'ablation pour lesquelles la sensibilité analytique et la haute résolution spatiale permettent de déterminer des concentrations élémentaires avec des limites de détection de l'ordre du ppm. Les paramètres utilisés dans notre projet sont les suivants ; fréquence de tir de 50 Hz, vitesse de 5 $\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, avec un diamètre de 30 μm à l'impact, en stratégie de tir laser standard (trajectoire rectiligne). Les résultats bruts ont été normalisés grâce à des standards externes [pastilles de verres certifiées (NIST 614, NIST 612, NIST 610), poudre d'otolithes certifiées (FEBS 1) et broya d'os (SRM 1486)] et rapportés à la quantité de calcium (Ca^{43}) ablatée grâce au logiciel (FOCAL 2.42, Classeur Excel, C.PECHEYRAN).

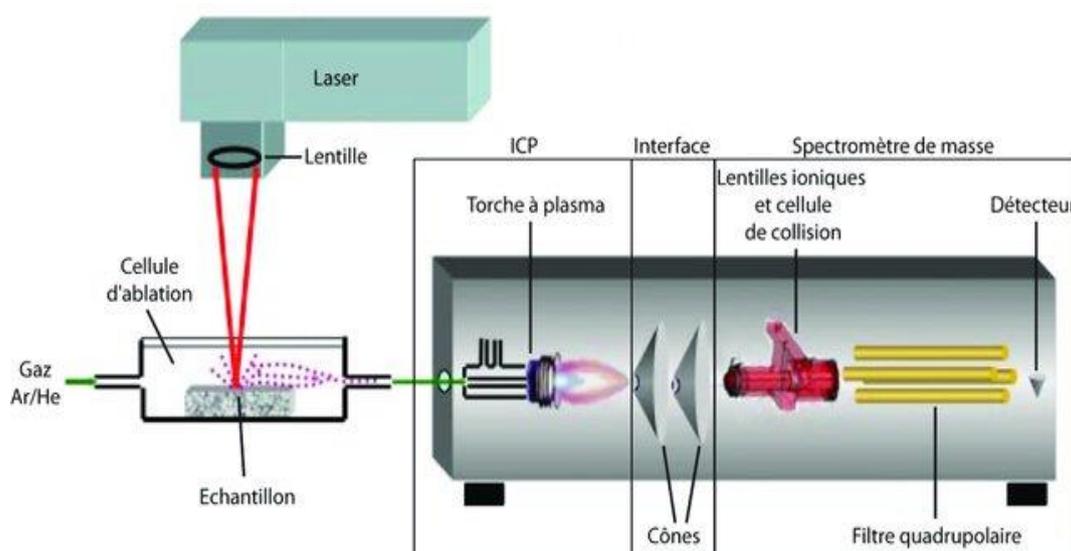


Schéma général d'un spectromètre de masse à plasma induit couplé à un système d'ablation laser (Pierre FEUTRY modifié d'après Tabouret 2009).

	Rivière	Zone	Phénotype	Ratio	Moyenne	Écart-type	Min.	Max.
A	CHATEAU	A	Sédentaire	Sr:Ca	1.22e-03	0.71e-03	0.23e-03	6.65e-03
	CHATEAU	A	Anadrome	Sr:Ca	3.62e-03	3.28e-03	1.07e-03	41.80e-03
B	MANCHOTS	A	Sédentaire	Sr:Ca	2.32e-03	0.91e-03	0.78e-03	5.35e-03
	MANCHOTS	A	Anadrome	Sr:Ca	3.17e-03	1.58e-03	0.98e-03	15.30e-03
C	NORVEGIENNE	A	Sédentaire	Sr:Ca	1.88e-03	0.80e-03	0.48e-03	4.58e-03
	NORVEGIENNE	A	Anadrome	Sr:Ca	3.02e-03	1.36e-03	0.61e-03	10.90e-03
D	CHATEAU	A	Sédentaire	Ba:Ca	2.30e-06	NA	0.30e-06	8.70e-06
	CHATEAU	A	Anadrome	Ba:Ca	2.40e-06	NA	0.40e-06	32.60e-06
E	MANCHOTS	A	Sédentaire	Ba:Ca	12.8e-06	9.45e-06	2.21e-06	53.40e-06
	MANCHOTS	A	Anadrome	Ba:Ca	2.17e-06	1.60e-06	0.14e-06	15.00e-06
F	NORVEGIENNE	A	Sédentaire	Ba:Ca	6.06e-06	4.88e-06	0.89e-06	18.80e-06
	NORVEGIENNE	A	Anadrome	Ba:Ca	4.90e-06	10.1e-06	0.50e-06	95.50e-06
G	CHATEAU	A	Sédentaire	Mn:Ca	7.50e-05	5.47e-05	1.02e-05	42.20e-05
	CHATEAU	A	Anadrome	Mn:Ca	3.42e-05	3.29e-05	0.73e-05	29.70e-05
H	MANCHOTS	A	Sédentaire	Mn:Ca	16.8e-05	12.9e-05	4.34e-05	76.70e-05
	MANCHOTS	A	Anadrome	Mn:Ca	3.61e-05	2.23e-05	0.70e-05	21.50e-05
I	NORVEGIENNE	A	Sédentaire	Mn:Ca	7.56e-05	5.20e-05	1.16e-05	22.70e-05
	NORVEGIENNE	A	Anadrome	Mn:Ca	3.58e-05	3.14e-05	0.69e-05	22.40e-05

Annexe 4: Tableau des paramètres statistiques des ratios élémentaires moyens de Sr:Ca, Ba:Ca et Mn:Ca dans la zone adulte « A », comparaison des individus des populations Château, Manchots et Norvégienne présentant un phénotype anadrome ou sédentaire.

	Rivière	Zone	Phénotype	Ratio	Moyenne	Écart-type	Min.	Max.
	CHÂTEAU	J	Anadrome	Sr:Ca	3.16e-03	1.46e-03	0.90e-03	7.76e-03
	CHÂTEAU	J	Sédentaire	Sr:Ca	1.35e-03	0.75e-03	0.28e-03	5.22e-03
	MANCHOTS	J	Anadrome	Sr:Ca	2.82e-03	1.31e-03	0.91e-03	9.02e-03
	MANCHOTS	J	Sédentaire	Sr:Ca	2.79e-03	1.18e-03	1.06e-03	7.02e-03
	NORVEGIENNE	J	Anadrome	Sr:Ca	2.91e-03	1.23e-03	0.76e-03	7.54e-03
	NORVEGIENNE	J	Sédentaire	Sr:Ca	2.03e-03	0.97e-03	0.85e-03	6.77e-03
	CHÂTEAU	J	Anadrome	Ba:Ca	2.50e-06	NA	0.60e-06	12.10e-06
	CHÂTEAU	J	Sédentaire	Ba:Ca	2.68e-06	1.76e-06	0.19e-06	13.50e-06
	MANCHOTS	J	Anadrome	Ba:Ca	4.04e-06	3.37e-06	0.63e-06	33.00e-06
	MANCHOTS	J	Sédentaire	Ba:Ca	11.30e-06	7.41e-06	3.58e-06	44.80e-06
	NORVEGIENNE	J	Anadrome	Ba:Ca	2.87e-06	1.82e-06	0.34e-06	11.00e-06
	NORVEGIENNE	J	Sédentaire	Ba:Ca	6.24e-06	3.45e-06	1.30e-06	18.50e-06
	CHÂTEAU	J	Anadrome	Mn:Ca	10.40e-05	8.02e-05	1.87e-05	53.60e-05
	CHÂTEAU	J	Sédentaire	Mn:Ca	12.40e-05	8.79e-05	1.94e-05	53.20e-05
	MANCHOTS	J	Anadrome	Mn:Ca	8.77e-05	8.35e-05	1.09e-05	75.10e-05
	MANCHOTS	J	Sédentaire	Mn:Ca	20.90e-05	9.36e-05	5.71e-05	46.90e-05
	NORVEGIENNE	J	Anadrome	Mn:Ca	7.18e-05	6.00e-05	0.74e-05	31.70e-05
	NORVEGIENNE	J	Sédentaire	Mn:Ca	8.28e-05	4.45e-05	2.01e-05	24.40e-05

Annexe 5: Tableau des paramètres statistiques des ratios élémentaires moyens de Sr:Ca, Ba:Ca et Mn:Ca dans la zone adulte « J », comparaison des individus des populations Château, Manchots et Norvégienne présentant un phénotype anadrome ou sédentaire.

Phénotypes	Ratio	Zone	Comparaisons des populations	<i>p</i> (test de wilcoxon)	Significativité
Sédentaire & Anadromes	Sr:Ca	J	MANCHOTS-CHATEAU	3.29e-09	****
Sédentaire & Anadromes	Sr:Ca	J	NORVEGIENNE-CHATEAU	2.29e-06	****
Sédentaire & Anadromes	Sr:Ca	J	NORVEGIENNE-MANCHOTS	1.97e-01	ns
Sédentaire & Anadromes	Ba:Ca	J	MANCHOTS-CHATEAU	<2.00e-16	****
Sédentaire & Anadromes	Ba:Ca	J	NORVEGIENNE-CHATEAU	2.00e-08	****
Sédentaire & Anadromes	Ba:Ca	J	NORVEGIENNE-MANCHOTS	5.99e-08	****
Sédentaire & Anadromes	Mn:Ca	J	MANCHOTS-CHATEAU	9.83e-01	ns
Sédentaire & Anadromes	Mn:Ca	J	NORVEGIENNE-CHATEAU	6.75e-11	****
Sédentaire & Anadromes	Mn:Ca	J	NORVEGIENNE-MANCHOTS	5.60 e-10	****

*Annexe 7 : Tableau des comparaisons par paires des ratios élémentaires moyens de Sr:Ca, Ba:Ca et Mn:Ca en zone juvénile J dans les rayons de nageoires, déterminés par le test de Wilcoxon. Les * représentent le niveau de significativité. Dans ce test, les individus anadromes et résidents sont regroupés.*

Phénotype	Rivières	Zones	Ratio	Moyenne	écart-type	Min	Max.
Sédentaires & Anadromes	CHATEAU	J	Sr:Ca	2.28e-03	1.48e-03	2.81e-04	7.76e-03
Sédentaires & Anadromes	NORVEGIENNE	J	Sr:Ca	2.66e-03	1.23e-03	7.62e-04	7.54e-03
Sédentaires & Anadromes	MANCHOTS	J	Sr:Ca	2.81e-03	1.27e-03	9.11e-04	9.02e-03
Sédentaires & Anadromes	CHATEAU	J	Ba:Ca	2.60e-06	NA	2.00e-07	1.35e-05
Sédentaires & Anadromes	NORVEGIENNE	J	Ba:Ca	3.82e-06	2.83e-06	3.47e-07	1.85e-05
Sédentaires & Anadromes	MANCHOTS	J	Ba:Ca	6.17e-06	5.90e-06	6.30e-07	4.48e-05
Sédentaires & Anadromes	CHATEAU	J	Mn:Ca	1.14e-04	8.44e-05	1.87e-05	5.36e-04
Sédentaires & Anadromes	NORVEGIENNE	J	Mn:Ca	7.49e-05	5.62e-05	7.44e-06	3.17e-04
Sédentaires & Anadromes	MANCHOTS	J	Mn:Ca	1.23e-04	1.02e-04	1.09e-05	7.51e-04

Annexe 8 : Tableau des paramètres statistiques des ratios élémentaires moyens de Sr:Ca, Ba:Ca et Mn:Ca en zone juvénile pour les populations Château, Norvégienne et Manchots. Dans ce test, les individus anadromes et résidents sont regroupés.

Acendance Maternelle	Zone	Ratio	Moyenne	Écart-type	Min.	Max.	Chi-square	p-value (Kruskal-Wallis)	Significativité
Anadrome	J	Sr:Ca	2.32e-03	1.43e-03	0.28e-03	7.67e-03	32.19	1.40e-08	****
Sédentaire	J	Sr:Ca	2.74e-03	1.27e-03	0.65e-03	9.02e-03			
Anadrome	J	Ba:Ca	2.96e-06	2.01e-06	0.19e-06	1.35e-05	42.03	9.00e-11	****
Sédentaire	J	Ba:Ca	4.90e-06	NA	0.30e-06	4.48e-05			
Anadrome	J	Mn:Ca	9.58e-05	7.70e-05	1.13e-05	53.66e-05	1.36	0.24	ns
Sédentaire	J	Mn:Ca	10.80e-05	9.01e-05	0.74e-06	75.17e-05			

Annexe 9 : Tableau des paramètres statistiques des ratios élémentaires moyens de Sr:Ca, Ba:Ca et Mn:Ca en zone juvénile pour les populations Château, Norvégienne et Manchots. Dans ce test, les individus anadromes et résidents sont regroupés.

IX. RESUME

Pour étudier la capacité du rayon de nageoire pectorale dans l'estimation de l'âge d'une part et dans la détermination de migrations en mer des individus anadromes de truite commune (*Salmo Trutta*) des îles Kerguelen, nous avons examiné d'une part les concordances dans l'estimations de l'âge entre le rayons et l'écaille et entre le rayon et l'otolithe. D'autre part, nous avons analysé les rapports du ^{86}Sr , ^{138}Ba et ^{55}Mn avec le ^{43}Ca dans les rayons de la nageoire pectorale par ablation laser-spectrométrie de masse à plasma inductif. Pour un échantillonnage de 65 poissons issus de 3 populations différentes, nous avons trouvé que l'âge peut être estimé efficacement mais en contrepartie d'une préparation chronophage. Une estimation similaire à l'âge estimé par l'écaille a été démontrée, un résultat positif nuancé par l'apparition de nombreux biais. Lors de l'analyse de la chimie du rayon, les ratios Sr:Ca , Ba :Ca et Mn :Ca se sont révélés efficaces dans la différenciation du statut migrateur dans une zone qui correspond à la croissance des adultes, en mer pour les anadromes et en eau douce pour les sédentaires. Ces analyses ont également montré qu'il serait possible à travers ces trois ratios élémentaires de définir le statut migrateur des génitrices dans la zone du rayon sous influence vitelline. Pour conclure, ces résultats préliminaires sont encourageant et suscitent de nouveaux questionnements.

Mots-clés : *Salmo trutta*, rayons de nageoire pectorale, sclérochronologie, microchimie, migration, îles Kerguelen

To study the capacity of the pectoral fin ray in age estimation on the one hand and in the determination of sea migrations of anadromous individuals of common trout (*Salmo Trutta*) from the Kerguelen Islands on the other hand, we examined the concordances in age estimation between the ray and the scale and between the ray and the otolith. Secondly, we analysed the ratios of ^{86}Sr , ^{138}Ba and ^{55}Mn to ^{43}Ca in pectoral fin rays by laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry. For a sample of 65 fish from 3 different populations, we found that age can be estimated efficiently but with time-consuming preparation. A similar estimate to the age estimated by scale was demonstrated, a positive result qualified by the occurrence of many biases. In ray chemistry analysis, Sr:Ca , Ba:Ca and Mn:Ca ratios were found to be effective in differentiating migratory status in a zone corresponding to adult growth, at sea for anadromous fish and in fresh water for sedentary fish. These analyses also showed that it would be possible through these three elementary ratios to define the migratory status of female spawners in the yolk-influenced zone of the ray. In conclusion, these preliminary results are encouraging and raise new questions.

Keywords: *Salmo trutta*, pectoral fin rays, sclerochronology, microchemistry, migration, Kerguelen Islands