UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

AUDITION CHEZ LES LARVES DE POISSONS ET EFFET DES SONS ANTHROPIQUES SUR LE COMPORTEMENT DE PHONOTAXIE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA

MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR

FRÉDÉRICK GIRARD

AOÛT 2026

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MAÎTRISE EN SCIENCE DE L'ENVIRONNEMENT (MSc)

Direction de recherche:

Raphaël Proulx

Prénom et nom — Directeur de recherche

Vincent Fugère

Prénom et nom — Codirecteur de recherche

Jury d'évaluation

Raphaël Proulx

Prénom et nom — Directeur de recherche

Christelle Leung

Prénom et nom — Membre interne du jury d'évaluation

Marc Mingelbier

Prénom et nom — Membre externe du jury d'évaluation

REMERCIEMENTS

J’aimerais particulièrement remercier mon directeur, Raphaël Proulx, et mon codirecteur, Vincent Fugère, pour leur aide, leur supervision, leurs apprentissages et leur disponibilité. Tous deux ont été des pièces clés à l’aboutissement de ce mémoire et de ma maîtrise.

Merci également aux trois autres membres du comité, Marco Rodriguez, Marc Mingelbier et Christelle Leung, dont leurs points de vue et recommandations ont permis de grandement améliorer le projet.

Je tiens à remercier Youri Simard, Camille Milot, Mathis Abran, Shawn Quessy et Laurence Godbout pour leur participation à la récolte de données, ainsi que Mélissa Lamoureux pour son aide à l’identification des spécimens. Je remercie aussi les membres de la Chaire de recherche en intégrité écologique (CRIE), du Laboratoire d’Écologie Fluviale (LEF) et du Centre de Recherche sur les interactions Bassins Versants – Écosystèmes Aquatiques (RIVE) pour leur soutien.

Finalement, je remercie l’Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR), le CRIE, le Réseau Québec Maritime (RQM) et le Groupe de Recherche Interuniversitaire en Limnologie (GRIL), dont le financement a permis la réalisation de ce projet.

AVANT-PROPOS

Le projet de recherche présenté dans ce mémoire a été réalisé dans le cadre du programme de maîtrise en sciences de l'environnement réalisé à l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR) entre 2024 et 2026. Ce projet a été conçu sous la direction de Raphaël Proulx et la codirection de Vincent Fugère, tous deux professeurs à l'UQTR. Le premier objectif de l'étude visait à décrire les capacités auditives des larves de poissons et l'impact de la taille corporelle et de la spécialisation auditive sur ces capacités, deux facteurs importants pour l'audition. Le deuxième objectif de l'étude consistait à caractériser la réponse comportementale des larves à la présence de sons anthropiques. À l'aide d'une approche expérimentale réalisée dans le Lac Saint-Pierre (Québec, Canada), les captures de larves de poissons ont été comparées entre deux types de zones : une zone témoin et une zone soumise à un traitement sonore dans lequel un son motorisé a été diffusé. Finalement, en combinant les résultats issus des deux objectifs, nous avons évalué l'effet de la capacité auditive des larves sur leur réponse comportementale en présence de sons anthropiques.

Le présent mémoire est composé de trois chapitres. Le Chapitre I présente en introduction une revue de littérature, suivie de la méthodologie du projet. Le Chapitre II contient le corps du travail rédigé sous forme d'article scientifique en anglais. Le Chapitre III présente conclusion générale du mémoire.

RÉSUMÉ

En milieu d'eau douce, les communautés de poissons font face à une pression grandissante attribuable à de multiples perturbations anthropiques. Parmi celles-ci, la pollution sonore demeure l'une des moins étudiées, même si elle engendre une grande variété de conséquences. Certaines recherches ont montré qu'en présence de sons anthropiques dans leur habitat, les poissons adultes adoptent un comportement d'évitement, soit une phonotaxie négative, modulé par leurs capacités auditives spécifiques. Cependant, la majorité des recherches se sont concentrées sur le stade adulte et les connaissances sur le stade larvaire demeurent limitées. Les larves de poissons possèdent une audition fonctionnelle, démontrent une phonotaxie positive envers des sons naturels en milieux marins, sont moins mobiles et sont peu conditionnées aux sons anthropiques, ce qui pourrait entraîner une réponse comportementale à la pollution sonore qui diffère du stade adulte. Le stade de vie larvaire étant le plus vulnérable, il est primordial de comprendre les effets des sons anthropiques sur ce stade particulier des poissons Ainsi, le but de la présente recherche est de caractériser le comportement de phonotaxie des larves de poissons face à des sons anthropiques et de déterminer comment leurs réponses sont influencées par leurs capacités auditives. On s'attend à voir les larves démontrer une phonotaxie négative envers les sons anthropiques et une réponse plus marquée avec des capacités auditives plus développées. Pour y répondre, l'étude a été divisée en deux objectifs. D'abord, en analysant une compilation d'audiogrammes provenant de la littérature, nous cherchions à caractériser la capacité auditive des larves de poissons en regardant l'effet de deux traits importants pour l'audition aux premiers stades de développement: la taille corporelle et la spécialisation auditive. Ensuite, nous cherchions à caractériser expérimentalement le comportement de phonotaxie des larves face aux sons anthropiques et comprendre l'effet de l'audition en utilisant les traits auditifs étudiés dans l'objectif précédent. Pour ce faire, nous avons identifié deux zones expérimentales en milieu naturel, une zone exposée à des sons motorisés et une zone contrôle exposée uniquement à des sons naturels, au sein desquelles les captures de larves ont été comparées. Contrairement à ce qui était attendu, les larves de poissons ont démontré une phonotaxie positive aux sons anthropiques. Cette attraction aux sons anthropiques pourrait constituer d'un piège écologique qui entrainerait les larves vers des habitats où elles seraient plus vulnérables aux perturbations et à la prédation.

Mots-clés : Larves de poisson, Son anthropique, Phonotaxie, Audition, Eau douce

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS ..... **iii**

AVANT-PROPOS ..... **iv**

RÉSUMÉ ..... **v**

LISTE DES TABLEAUX ..... **viii**

LISTE DES FIGURES ..... **ix**

CHAPITRE I

INTRODUCTION **1**

1.1 Problématique **1**

1.2 Comportement des poissons face au son **3**

1.2.1 Phonotaxie chez les larves *3*

1.2.2 Phonotaxie face aux sons anthropiques *3*

1.3 Le son et l'audition **5**

1.4 Spécialisations auditives **6**

1.4.1 Adaptations du système auditif *6*

1.4.2 Niveaux de spécialisations auditives *8*

1.5 Ontogénie de l'audition **10**

1.5.1 Croissance de la taille corporelle *10*

1.5.2 Développement des spécialisations *11*

1.6 Question de recherche, objectifs et hypothèses **13**

1.7 Synthèse des seuils auditifs **14**

1.8 Approche expérimentale **15**

1.8.1 Site d'échantillonage *15*

1.8.2 Plan d'expérience *15*

1.8.3 Traitement sonore *17*

1.8.4 Taille corporelle et abondance *18*

1.8.5 Identification des larves *18*

CHAPITRE II

FISH LARVAE AUDITION AND THEIR RESPONSE TO ANTHROPOGENIC SOUNDS 20

2.1 Abstract 20

2.2 Introduction 21

2.3 Methods 24

2.3.1 Classification of auditory specializations 24

2.3.2 Literature synthesis: Effects of size and specialization on hearing thresholds 25

2.3.3 Field experiment: Effect of audition on the response to anthropogenic sounds 26

2.4 Results 33

2.4.1 Literature synthesis: Effects of size and specialization on hearing thresholds 33

2.4.2 Field experiment: Effect of audition on the response to anthropogenic sounds 35

2.5 Discussion 39

2.5.1 Literature synthesis: Effects of size and specialization on hearing thresholds 40

2.5.2 Field experiment: Effect of audition on the response to anthropogenic sounds 42

2.6 Conclusion 46

2.7 References 47

CHAPITRE III

CONCLUSION GÉNÉRALE 55

3.1 Contextualisation 55

3.2 Principaux résultats 57

3.3 Discussion 58

3.4 Prochaines étapes et limites de la recherche 61

3.5 Conclusion 63

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 64

ANNEXE A 74

ANNEXE B 75

ANNEXE C 76

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 2.1

Details of sampling nights and their larval abundance. 33

ANNEXE A

Répertoire de données concernant l'analyse des seuils auditifs..... 74

ANNEXE B.1

Sorties statistiques de l'analyse des seuils auditifs 75

ANNEXE B.2

Caractérisation des droites de l'analyse des seuils auditifs 75

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.1
Types d'adaptations du système auditif chez les poissons..... 8

FIGURE 1.2
Représentation du continuum de 7 niveaux de spécialisation auditive..... 10

FIGURE 1.3
Schématisation d'un site d'échantillonnage. 17

FIGURE 2.1
Characterization of the sound treatment..... 29

FIGURE 2.2
Auditory thresholds of fish larvaerelative to their body length and specialization. 35

FIGURE 2.3
Effect of body length on the response to anthropogenic sounds..... 37

FIGURE 2.4
Effect of specialisation and sound treatment on larvae..... 39

FIGURE 2.5
Suggested hearing sensitivity classification in larval bony fish. 42

FIGURE 3.1
Capacités auditives des larves de poissons en trois catégories..... 59

ANNEXE C
Description des captures dans les sorties à faible abondance 76

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1 Problématique

Le paysage acoustique en milieu aquatique comprend l'ensemble des sons de nature biologique, la biophonie, de nature géologique, la géophonie, ainsi que ceux produits par les humains, l'anthrophonie (Pijanowski et al., 2011). Le paysage acoustique joue d'ailleurs un rôle de premier plan pour la faune aquatique (Velde et al., 2024). Par exemple, la production et la réception de signaux sonores par les animaux aquatiques modulent un grand nombre d'interactions, à la fois intraspécifiques et interspécifiques, telles que la communication, la navigation, la prédation et la reproduction (Duarte et al., 2021; Slabbekoorn et al., 2010).

Comme les sons de nature anthropique ont fortement augmenté au cours des dernières décennies (Shannon et al., 2016), le paysage acoustique en milieu aquatique a grandement changé et il importe donc d'en mesurer les effets sur la faune aquatique. Par exemple, au Canada, la pratique des activités nautiques récréatives a augmenté de 12% entre 2012 et 2016 (Nautisme Québec, 2021). Initialement, les recherches se sont principalement intéressées aux effets des sons anthropiques sur les mammifères marins (Slabbekoorn et Ripmeester, 2008; Williams et al., 2015). Plus récemment, les travaux de recherche portant sur la réponse des poissons aux sons anthropiques en milieux d'eau douce ont connu un engouement grandissant (Barbeau et al., 2024; Holt et Johnston, 2015; Mingelbier et al., 2016; Pieniazek et al., 2020).

Plusieurs travaux de recherche ont montré que les sons anthropiques sont associés à une panoplie de réponses chez les poissons (e.g. Holt et Johnston, 2011; Popper et Hawkins, 2019;

Slabbekoorn et al. 2010; Whitfield et Becker, 2014). Tout d'abord, les sons anthropiques peuvent entraîner une augmentation du stress (Cox et al., 2018; Popper et Hastings, 2009; Whitfied et Becker, 2014). D'autres études ont observé une réduction du taux de survie des œufs, de la reproduction et de la croissance (Cox et al., 2018; Holt et Johnston, 2015; Popper et Hastings, 2009), mais aussi une diminution du temps alloué à la recherche de nourriture (Cox et al., 2018; Nedelec et al., 2016; Pieniazek et al., 2020), un évitement des zones comportant des sons anthropiques (Barbeau et al., 2024; Nedelec et al., 2016; Pieniazek et al., 2020) et l'interruption d'activités essentielles, comme la défense de territoire (Nedelec et al., 2016; Picciulin et al., 2010; Slabbekoorn et al. 2010). De plus, même sans directement augmenter le stress chez les poissons, l'augmentation des sons anthropiques pourrait nuire en masquant la communication entre les individus et à la détection des proies et des prédateurs, en plus de modifier le choix des partenaires (Holt et Johnston, 2011; Popper et Hawkins, 2019; Slabbekoorn et al. 2010). À long terme, la présence de sons anthropiques pourrait altérer les abondances de poissons en milieu naturel (Popper et Hastings, 2009; Popper et Hawkins, 2019; Whitfied et Becker, 2014).

La majorité des études qui s'intéressent à l'effet des sons anthropiques sur les poissons se concentrent sur les poissons juvéniles et adultes. L'effet des sons anthropiques sur les larves de poissons demeure beaucoup moins étudié (Duarte et al., 2021). Or, il est démontré que l'audition chez les poissons est déjà fonctionnelle au stade larvaire (Radford, Tindle et al., 2011; Tolimieri et al, 2000; Wright et al., 2011). Les larves sont encore peu conditionnées aux sons anthropiques et pourraient répondre à la présence de ceux-ci différemment des poissons aux stades de développement subséquents.

1.2 Comportement des poissons face au son

1.2.1 Phonotaxie chez les larves

Que ce soit en milieu marin (Wright et al., 2011) ou en milieu d'eau douce (Bertolo et al., 2012), la sélection d'habitats chez les larves de poissons est un processus actif. Par exemple, plusieurs études en milieu marin montrent que les larves de poissons détectent les sons sur de grandes distances pour localiser et distinguer les habitats de croissance (Gordon et al., 2019; Leis et al., 2011; Radford, Stanley et al., 2011; Radford, Tindle et al., 2011). La capacité des larves à utiliser le paysage acoustique pour sélectionner les habitats dépend de plusieurs facteurs, dont notamment la taille du corps, la présence de spécialisations auditives et la qualité du signal acoustique (Leis et al., 2011). Les larves de poissons ont aussi la capacité de localiser la source du son (Radford, Stanley et al., 2011; Radford, Tindle et al., 2011), ce qui leur permet de se déplacer, la nuit, en direction de l'habitat sélectionné (Leis et Lockett 2005; Tolimieri et al., 2002; Tolimieri et al., 2004). En somme, les sons provoquent un déplacement chez les larves de poisson, un comportement qui est appelé la phonotaxie. Une phonotaxie peut soit être positive, représentant un mouvement en direction de la source du son, soit être négative, représentant un mouvement s'éloignant de la source du son.

1.2.2 Phonotaxie face aux sons anthropiques

La sélection d'habitats de croissance par les larves de poissons est potentiellement influencée par la présence d'une source de sons anthropiques. Au meilleur de nos connaissances, seules cinq études ont examiné la réponse d'évitement des larves aux sons anthropiques. D'abord, les résultats de Jung et Swearer (2011) suggèrent que la réponse d'évitement ne change pas en fonction de la présence ou de l'absence d'un son anthropique périodique; i.e., l'émission artificielle

de sons imitant le passage d'un bateau. Ces mêmes auteurs ont également démontré que certaines larves de poissons associées à des récifs étaient davantage attirées vers un habitat associé à des sons anthropiques portuaires constants que vers un habitat associé à des sons ambiants naturels. De façon comparable, Cresci et al. (2023) ont aussi observé une plus grande attraction des larves de morue (*Gadus morhua*) envers des sons anthropiques constants de basse fréquence provenant d'éoliennes en mer.

Holles et al. (2013) ont étudié la réponse d'évitement aux sons anthropiques des larves de poissons en milieu semi-contrôlé en utilisant des chambres de choix. Confrontées à l'émission artificielle de sons côtiers naturels, 68 % des larves de poissons ont eu une réponse d'attraction, alors que 8% des larves ont eu une réponse d'évitement et 24% des larves ont eu une réponse neutre. Lorsqu'elles ont été confrontées à l'émission constante d'enregistrements de sons motorisés, 54% des larves ont eu une réponse d'attraction, 46% des larves ont eu une réponse d'évitement, tandis qu'aucune larve n'a eu de réponse neutre. En d'autres mots, les résultats de ces expériences suggèrent que les larves peuvent autant être attirées par les sons anthropiques que chercher à les éviter. Waddell et Sirovic (2023) ont aussi obtenu des réponses d'évitement variables des larves de poissons face à la présence de sons anthropiques. Leurs résultats ont montré un évitement initial des sons de fusils à air, mais pas d'évitement systématique des sons de bateaux. Par ailleurs, les résultats pointent vers une désensibilisation des larves avec le temps d'exposition aux sons anthropiques. Cependant, l'étude s'est déroulée en milieu contrôlé en utilisant des larves élevées en laboratoire, limitant ainsi l'applicabilité des résultats en milieu naturel.

Finalement, Simpson et al. (2016) ont créé des habitats côtiers artificiels pour ensuite insérer deux traitements sonores à l'intérieur de ceux-ci, soit une émission artificielle a) de sons ambiants côtiers et b) de sons anthropiques (passage de bateau) et ambiants combinés. Les résultats

ont montré que 61% des larves capturées se sont dirigées vers l'émission artificielle de sons ambiants côtiers, tandis que 39% de celles-ci se sont dirigées vers l'habitat comportant aussi des sons anthropiques. Cependant, la superposition de sons anthropiques et ambiants pourrait avoir influencé leurs résultats. En effet, l'enrichissement acoustique du son ambiant naturel d'un habitat peut avoir comme effet d'augmenter le recrutement des larves de poissons (Gordon et al., 2019).

1.3 Le son et l'audition

Les signaux acoustiques se propagent beaucoup plus rapidement sous l'eau que dans l'air. Ils présentent aussi deux modes de propagation distincts, soit la propagation cinétique et la propagation par l'onde de pression (Slabbekoorn et al., 2010). La propagation cinétique résulte directement du mouvement des particules et s'atténue sur de courtes distances (Popper et Hawkins, 2018; Slabbekoorn et al., 2010). Au contraire, la propagation du son via l'onde de pression se fait sur de grandes distances, voire plusieurs kilomètres en eaux libres (Popper et Hawkins, 2018; OSPAR, 2009). Selon ce mode de propagation, l'onde alterne des zones de forte pression, nommées les zones de compression, et des zones de basse pression, nommées les zones de dilatation (Popper et Hawkins, 2018; OSPAR, 2009). Le signal acoustique ainsi généré peut être décrit par le spectre de puissance, qui décompose la puissance de l'onde sonore exprimée en décibels (dB) à différentes plages de fréquences exprimées en hertz (Hz).

Les embarcations motorisées sont une source de plus en plus importante de sons anthropiques en milieu aquatique (Jalkanen et al., 2022), où divers types de moteurs peuvent avoir des effets différents sur les communautés aquatiques (McCormick et al., 2018). De manière générale, les sons motorisés de plus forte puissance et couvrant une plus large gamme de

fréquences se propagent sur de plus longues distances. La distance de propagation dépend aussi des propriétés du milieu; par exemple, la distance de propagation des sons de moteurs sera fortement diminuée dans les environnements peu profonds, constitués d'un substrat meuble et comportant une forte densité de végétation submergée (Rogers et Cox, 1988; Lagrois et al., 2025).

L'audition des poissons est largement influencée par le mode de propagation du son dans l'eau. Tout d'abord, la composante cinétique du son peut être captée par la grande majorité des espèces de poissons (Ladich et Schulz-Mirbach, 2016). Le mouvement des particules associé à ce mode de propagation entraîne un mouvement des otolithes, ce qui active les cellules sensorielles de l'oreille interne (Ladich et Schulz-Mirbach, 2016). En revanche, la capacité à détecter l'onde de pression acoustique est généralement associée à la vessie natatoire, un sac de gaz permettant la flottaison qui est absente chez les poissons cartilagineux (Ladich et Schulz-Mirbach, 2016; Popper et Fay, 2011). L'onde de pression fait vibrer la vessie natatoire et le signal se transmet ensuite vers l'oreille interne (Ladich et Schulz-Mirbach, 2016). De manière générale, une plus grande distance entre la vessie natatoire et l'oreille interne signifie une plus grande perte de signal (Zebedin et Ladich, 2013). La majorité des poissons osseux ont une vessie natatoire, sauf quelques groupes de poissons benthiques ou abyssaux qui ont perdu leur vessie natatoire au cours de leur histoire évolutive (McCune et Carlson, 2004).

1.4 Spécialisations auditives

1.4.1 Adaptations du système auditif

Afin de diminuer la perte de signal entre la vessie natatoire et l'oreille interne, plusieurs espèces de poissons ont évolué vers des systèmes auditifs spécialisés (Hu et al. 2022). On

dénombre trois types différents d'adaptations du système auditif chez les poissons (Hu et al., 2022; Ladich et Schulz-Mirbach, 2016). Tout d'abord, plusieurs espèces possèdent une vessie natatoire modifiée dont l'extension va s'approcher ou même se connecter à l'oreille interne (Braun et Grande, 2008) (**Fig. 1.1A**). Le deuxième type d'adaptation consiste en la présence d'une série de trois ou quatre petits osselets, appelés l'appareil de Weber, qui relient la vessie natatoire à l'oreille et permettent une transmission du signal sonore plus efficace (Barbeau et al. 2024; Ladich et Schulz-Mirbach, 2016) (**Fig. 1.1.B**). Enfin, d'autres espèces ont une autre bulle d'air, adjacente à l'oreille interne, qui offre une distance de transmission plus courte (Hu et al., 2022; Ladich et Schulz-Mirbach, 2016) (**Fig.1.1C**). Les espèces du sous-ordre *Anabantoidei* possèdent une chambre d'air indépendante, l'organe labyrinthe, qui leur permet de respirer l'air capturé par la bouche (Braun et Grande, 1970). Les espèces avec (**Fig.1.1D**) ou sans vessie natatoire (**Fig.1.1E**), mais qui ne possèdent pas d'adaptations particulières et sont considérées comme ayant une acuité auditive inférieure (Barbeau et al., 2024).

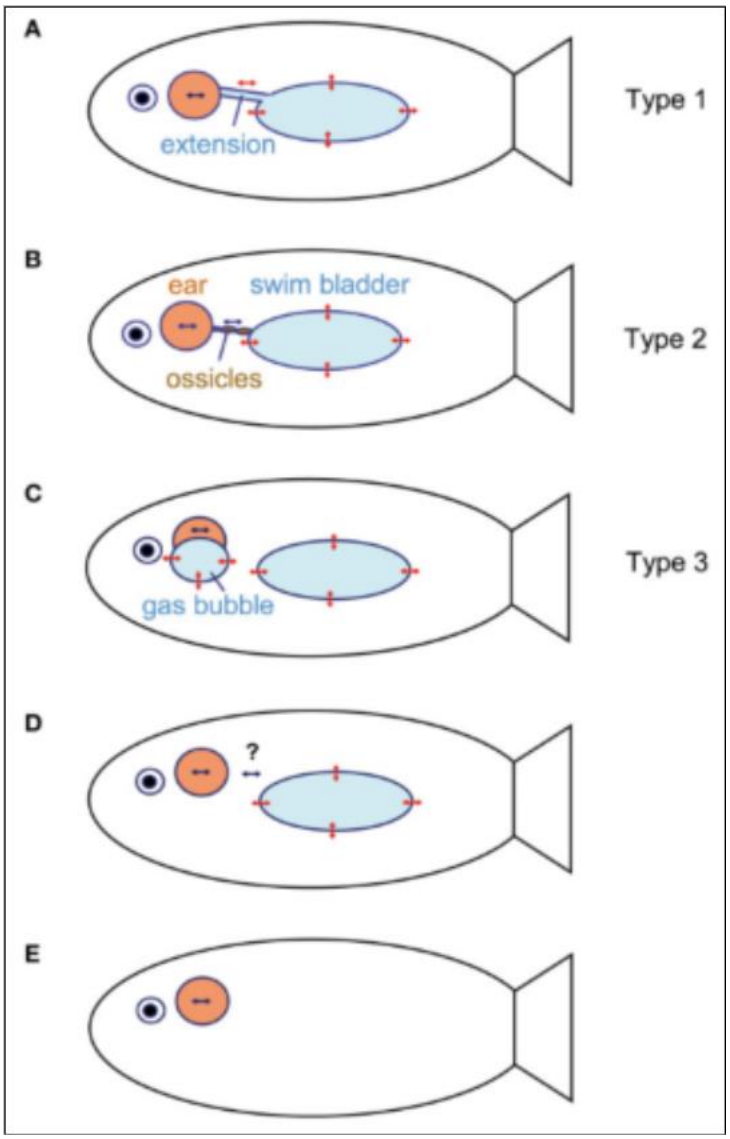


Figure 1.1 : Types d'adaptations du système auditif chez les poissons. La figure est tirée de Ladich et Shultz-Mirbach (2016), et illustre (A) une extension de la vessie natatoire, (B) un appareil de Weber, (C) une bulle d'air annexe, (D) une vessie natatoire uniquement et (E) l'absence de vessie natatoire.

1.4.2 Niveaux de spécialisations auditives

Historiquement, les espèces de poissons étaient divisées en deux catégories de spécialisation auditive. Les espèces ne possédant pas d'adaptation particulière (**Fig. 1.1D-E**)

étaient considérées comme généralistes, tandis que celles qui en possédaient étaient considérées comme spécialistes (Amoser et Ladich, 2003). Aujourd'hui, on fait davantage référence à un continuum de spécialisations composé de plusieurs niveaux d'utilisation de l'onde de pression (Popper et Fay, 2011; Popper et al., 2022; Wiernicki et al., 2020). Popper et al. (2022) propose un modèle théorique distinguant sept niveaux de spécialisations (**Fig.1.2**). En ordre croissant de capacité auditive, ces niveaux de spécialisation regroupent les espèces sans vessie natatoire (Groupe A), celles possédant uniquement une vessie natatoire éloignée de l'oreille interne (Groupe B), celles possédant une vessie natatoire avec une extension qui s'en rapproche (Groupe C), celles possédant une vessie natatoire et une bulle d'air auxiliaire non reliée à l'oreille interne (Groupe D), celles possédant une vessie natatoire et une bulle d'air auxiliaire reliée à l'oreille interne (Groupe E), celles possédant une extension de la vessie natatoire reliée directement à l'oreille interne (Groupe F) et, finalement, les espèces ostariophysiennes possédant un appareil de Weber (Groupe G).

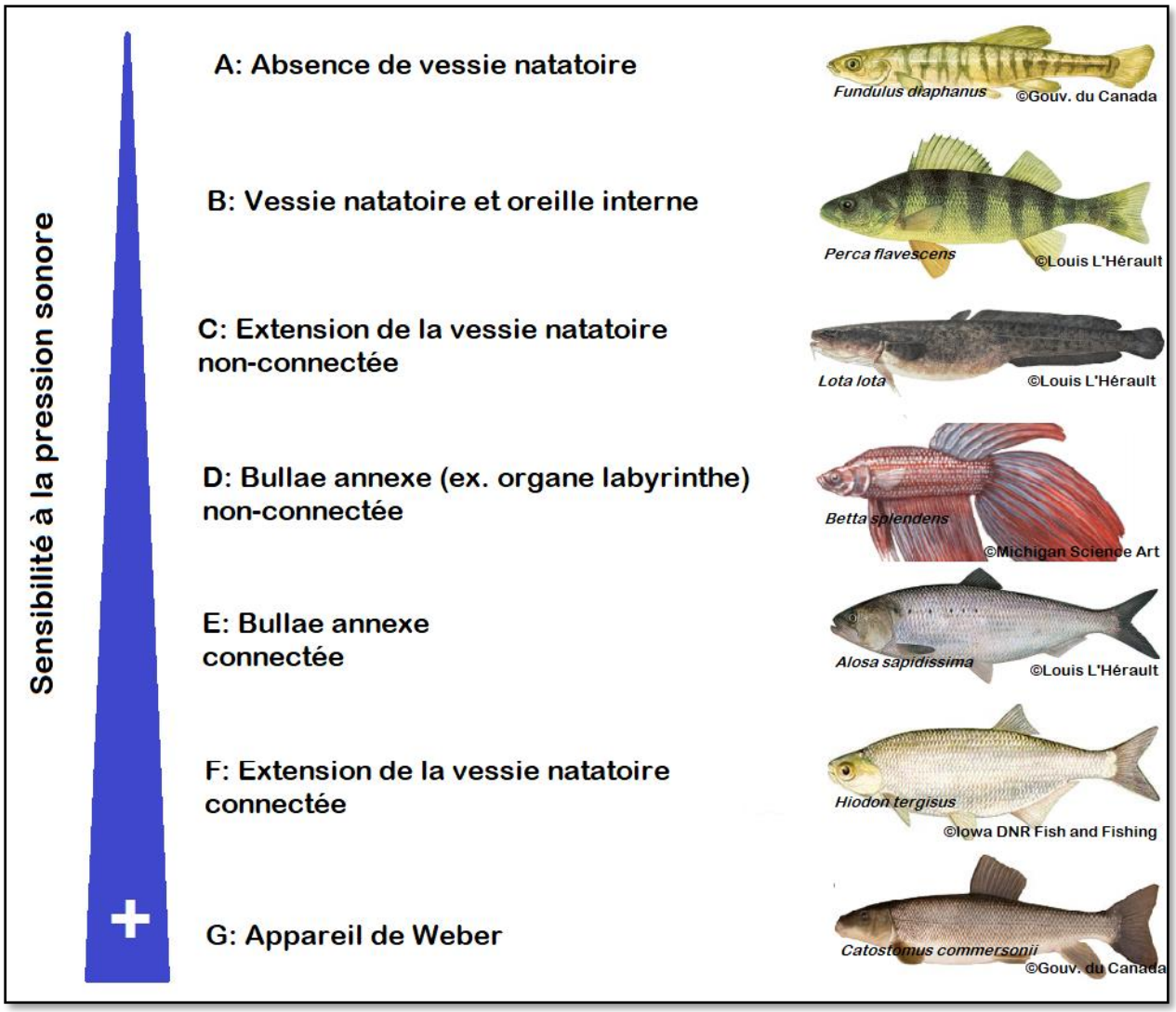


Figure 1.2 : Représentation du continuum de 7 niveaux de spécialisation auditive. Cette illustration a été modifiée à partir de Popper et al. (2022) qui est inspirée de Popper et Fay (2011). La figure représente les sept niveaux de spécialisation associés à des espèces présentes au Québec. Seul le groupe D ne possède pas de représentant natif dans les écosystèmes, demeurant uniquement un animal domestique commun.

1.5 Ontogénie de l'audition

1.5.1 Croissance de la taille corporelle

La distinction entre les différentes catégories de spécialisation auditive est plus difficile à faire chez les larves, puisque leurs organes n'ont pas fini de se développer. Chez les poissons adultes et juvéniles, la capacité auditive tend à s'améliorer avec la croissance (Corwin 1983;

Vasconcelos et Ladich, 2008), quoique l'effet contraire ait été observé chez certaines espèces (Egner et Mann, 2005; Stanley et al., 2020). Chez les larves, la capacité auditive augmente aussi lors de leur croissance en taille (Blaxter et Bratty, 1985; Fuiman et al. 1999; Iwashita, 1999; Lu et Desmith, 2013; Sisneros et Bass, 2005).

Plusieurs mécanismes pourraient expliquer la relation entre la taille du corps et la capacité auditive des larves. Tout d'abord, chez une même espèce, le volume de la vessie natatoire est proportionnel à la taille du corps (Yan et al., 2000). Puisque la fréquence de résonance de la vessie natatoire est déterminée par son volume, la croissance en taille d'un poisson entraîne une augmentation de sa capacité auditive dans les basses fréquences (Proulx et al., 2019). Par ailleurs, le développement de l'oreille interne pourrait aussi avoir un effet sur l'audition du poisson, mais la littérature ne nous permet pas de le confirmer pour le moment (Popper et al., 2005). Vasconcelos et al. (2016) soutiennent que la physiologie et le développement des trois organes de l'oreille interne, le *saccule*, la *lagena* et l'*utricule*, ainsi que l'augmentation du nombre de cellules ciliées au cours de la croissance du poisson, pourraient améliorer l'audition.

1.5.2 Développement des spécialisations

Une relation entre la taille corporelle et l'audition n'est pas systématiquement présente chez les espèces possédant une spécialisation de leur système auditif. Le moment d'apparition et le rythme de développement des organes issus des spécialisations auditives varient selon la nature de ces dernières. Plusieurs recherches, chez des espèces avec un niveau élevé de spécialisation auditive, ont trouvé que la période avec la plus grande augmentation des capacités auditives était lors du développement ontogénique de ces spécialisations (Higgs et al., 2003; Higgs et al., 2004;

Lechner et al., 2011). Par exemple, Higgs et al. (2003) et Higgs et al. (2004) n'ont trouvé aucun changement dans la capacité auditive chez les espèces *Danio rerio* (**Fig. 1.2G**) et *Alosa sapidissima* (**Fig. 1.2E**) après le développement de leur spécialisation.

Les espèces possédant une extension de la vessie natatoire au stade adulte, ou une bulle d'air annexe issue d'une extension de la vessie natatoire, ont généralement une vessie natatoire ovale et non modifiée chez les jeunes stades (Vieira et al., 2023). Les modifications de la vessie natatoire se distinguent progressivement au cours de la croissance des individus (Birindelli et al., 2009). Vieira et al. (2023) ont montré que l'extension de la vessie natatoire apparait seulement vers la fin du stade larvaire. En d'autres mots, les larves de poissons n'ont pas la capacité d'utiliser le plein potentiel de cette spécialisation auditive pendant les premiers stades de développement. Ainsi, il est difficile de différencier les trois spécialisations issues d'une modification de la vessie natatoire (groupes C, E et F) chez des poissons au stade larvaire, puisque la vessie natatoire n'est toujours pas suffisamment développée.

En revanche, chez les espèces possédant une bulle d'air annexe indépendante, celle-ci apparaît dans les deux à quatre premières semaines de développement (Wysocki et Ladich, 2001). Cette spécialisation serait donc plus rapidement disponible chez ces larves.

Chez les ostariophysiens, l'appareil de Weber n'est pas présent à la naissance des larves puisque les osselets qui le composent ne sont toujours pas différenciés des vertèbres (Rosen et Greenwood, 1970). En effet, Grande et Young (2004) ont montré chez le cyprinidé *Danio rerio* que le premier osselet, le *tripus*, se forme 22 jours après la fécondation de l'œuf (« days post fertilization », ou *dpf*). De même, le deuxième et le troisième osselet, le *scaphium* et l'*intercalarium*, commencent à se former après 23 *dpf* alors que le dernier osselet, le *claustrum*, commence seulement à se former après 39 *dpf*. L'apparition non simultanée des osselets

influencerait la capacité auditive des larves, puisque cette dernière est positivement corrélée au nombre d'osselets présents (Lechner et Ladich, 2008).

1.6 Question de recherche, objectifs et hypothèses

La phonotaxie des larves de poissons en réponse à des sons anthropiques demeure relativement peu étudiée. Les études précédentes, toutes menées en milieu marin, ont obtenu des résultats ambigus qui ne permettent pas de déterminer la nature de la phonotaxie des larves de poissons (Cresci et al., 2023; Holles et al., 2013; Jung et Swearer, 2011; Simpson et al., 2016; Waddell et Sirovic, 2023). Cette ambiguïté pourrait être en partie expliquée par l'interaction entre la taille du corps et la présence de différents niveaux de spécialisation auditive chez les larves.

Notre étude tentera donc de répondre à la question de recherche suivante : ***En milieu d'eau douce, les larves de poissons démontrent-elles une réponse de phonotaxie face aux sons anthropiques et comment ce comportement est-il influencé par la taille corporelle et la présence de spécialisation auditive ?***

Pour y répondre, l'étude comprend deux objectifs distincts. Le premier objectif est de caractériser, chez les larves de poissons, la relation entre la capacité auditive, la taille corporelle et la spécialisation auditive, basée sur une analyse de données provenant de la littérature. De manière générale, on s'attend à observer une augmentation des capacités auditives des larves de poissons avec l'augmentation de leur taille corporelle et que cette relation soit plus marquée chez les espèces avec un système auditif spécialisé nécessitant un plus long temps de développement.

Le deuxième objectif est d'évaluer le comportement d'évitement en milieu naturel, avec une approche expérimentale. Nous déterminerons si les larves de différentes espèces de poissons

d'eau douce démontrent une phonotaxie négative (évitement), positive (attraction), ou neutre (absence de réponse) face à des sons anthropiques et si ce comportement est influencé par leurs capacités auditives. Comme pour le stade adulte, la prédiction est que les larves de poissons démontreront une phonotaxie négative face aux sons anthropiques. On s'attend aussi à ce que les capacités auditives des larves déterminent l'amplitude de la réponse ; une phonotaxie plus importante chez les larves de grande taille issues de groupes acoustiquement spécialisés.

1.7 Synthèse des seuils auditifs

Pour répondre au premier objectif, des audiogrammes de larves de poisson, provenant de la littérature, ont été utilisés. Des données de seuils auditifs, associées à une taille corporelle, ont été considérées à quatre fréquences couramment testées,100 Hz, 200 Hz, 400 Hz et 800 Hz. Au total, 22 espèces, provenant de 16 études différentes, ont été incluses (**Annexe A**). Par la suite, chaque espèce a été associée à son groupe de spécialisation auditive. De plus, à partir de la taille corporelle des larves testées, les audiogrammes ont été répartis en cinq classes de taille : [5, 15[mm, [15, 25[mm, [25, 35[mm, [35, 45[mm et [45, 55[mm. En somme, cette synthèse de seuils auditifs a permis de comparer les différents groupes de spécialisation auditive, notamment en ce qui concerne la pente de la relation entre les seuils auditifs et la taille, ainsi que le seuil auditif observé chez les plus petites larves.

1.8 Approche expérimentale

1.8.1 Site d'échantillonnage

Les expériences se sont déroulées dans le fleuve Saint-Laurent, sur la rive nord du Lac Saint-Pierre (LSP) à proximité de la ville de Louiseville (Québec, Canada) (46°12'55"N 72°56'07"W). Le LSP est la section du fleuve Saint-Laurent qui comporte la plus grande richesse en espèces de poissons (Mingelbier et al., 2016) et possède les statuts de réserve mondiale de la Biosphère de l'UNESCO (2000) et de zone humide d'importance internationale de la Convention Ramsar (1998). Le secteur visé est peu profond (entre 100 et 150 cm) et soumis à des sons anthropiques issus surtout des activités récréatives (Mingelbier et al. 2023). On retrouve au LSP un grand nombre d'espèces appartenant aux catégories B et G de spécialisations auditives (**Fig. 1.2**), mais aussi certaines espèces appartenant au groupe A (e.g. *Fundulus diaphanus*), au groupe C (e.g. *Lota lota*), au groupe E (e.g. *Alosa sapidissima*) et au groupe F (e.g. *Hiodon tergisus*).

1.8.2 Plan d'expérience

Les expériences d'évitement des sons anthropiques ont été menées en 2024 et 2025 entre la fin du mois d'avril et la fin du mois d'août. Cet intervalle permet de couvrir les périodes d'éclosions de la quasi-totalité des espèces communes qui fraient au LSP (Gouvernement du Québec, 2024). Chaque expérience consistait à capturer des larves de poissons dans une zone de contrôle (sons ambiants seuls) et une zone de traitement (sons anthropiques motorisés ajoutés). Les expériences se sont déroulées après le coucher du soleil, étant donné que les larves de poissons sont capturées en utilisant des pièges lumineux passifs (Quadrafoil larval fish light trap, WaterMark, Jackson, USA), une méthode décrite comme la plus efficace pour récolter des poissons au stade larvaire (Niles et Hartman, 2007; Tolimieri et al., 2004). Chaque piège était

installé dans une colonne d'eau environ 1 mètre de profondeur et était équipé d'un bâton fluorescent vert de 15 cm (Chemical lightstick, Cyalume, West Springfield, USA) (Reynalte-Tataje et al., 2024). Lors de chaque sortie, deux expériences ont été réalisées simultanément dans deux sites distincts du secteur d'étude. À chaque site, nous avons déterminé une zone contrôle et une zone traitement situées à environ 200 mètres l'une de l'autre ; une distance qui a été testée préalablement pour vérifier que le son du traitement ne se propageait pas d'une zone à l'autre (**Fig. 1.3**). La zone contrôle comprenait uniquement deux pièges lumineux. La zone de traitement comprenait, en plus de deux pièges lumineux, une pompe électrique motorisée (M12 stick transfer pump, Milwaukee Tool, Brookfield, USA) positionnée à environ 2 mètres de chacun des pièges et montée sur une tige en acier.

L'échantillonnage des larves à chaque site débutait à la dernière lueur du jour et était d'une durée totale de 60 minutes, pendant lesquelles où la pompe motorisée était mise en fonction pendant la totalité du temps. À la fin de l'expérience, les contenus des deux pièges dans chacune des zones ont été jumelés pour ne former qu'un seul échantillon. Au laboratoire, les larves de chaque échantillon ont été réparties sur un plateau et prises en photo en y incluant une mesure de référence. Finalement, les échantillons ont été congelés à une température de -80°C. Ainsi, quatre échantillons de larves étaient générés à chaque sortie sur le terrain (2 sites x 2 zones).

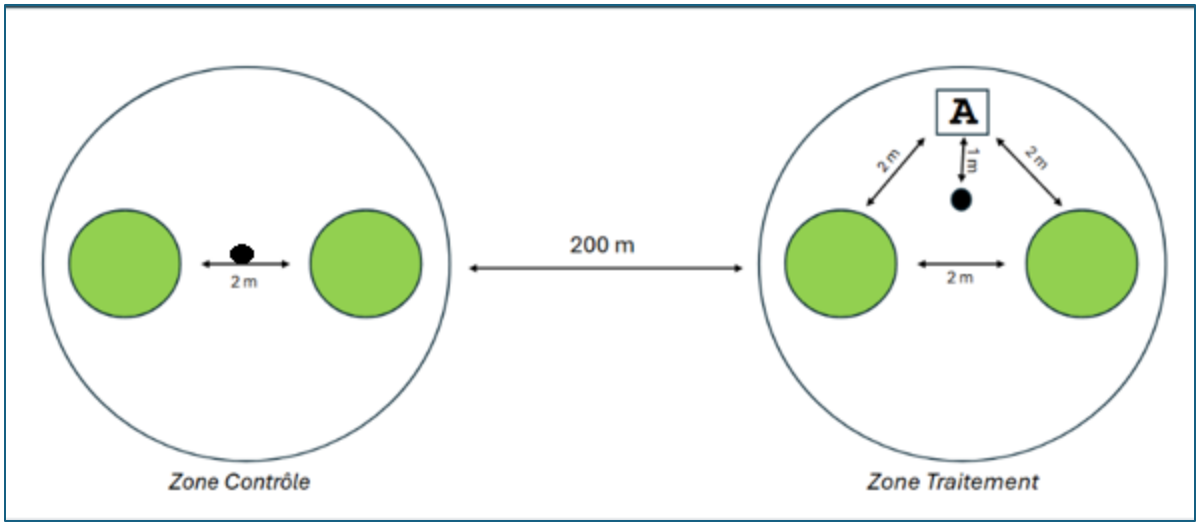


Figure 1.3 : Schématisation d'un site d'échantillonnage. Les cercles verts représentent les pièges lumineux, le cercle noir représente l'enregistreur audio et le carré « A » représente la source de sons anthropiques. À chaque sortie sur le terrain, deux sites ont été échantillonnés.

1.8.3 Traitement sonore

D'abord, un hydrophone (Hydromoth, Open Acoustic Devices, Oxford, UK) a été immergé à 0.3 mètre de profondeur entre les deux pièges, dans les deux types de zones, dans le but de comparer les sons entre le contrôle et le traitement sonore. La fréquence dominante du traitement sonore était de (523.6 ± 65.3) Hz, tandis que le ΔdB (différence d'intensité sonore entre le contrôle et le traitement sonore) était de (16.0 ± 0.3) dB en 2024 et de (31.4 ± 2.5) dB en 2025. La différence de ΔdB entre les deux années d'échantillonnage provient peut-être d'une plus forte intensité du son ambiant en 2024, puisque les sites étaient plus exposés aux vents et aux vagues. En 2025, l'échantillonnage se faisait près de la berge dans de la végétation plus dense. Le traitement sonore a aussi été enregistré et analysé à un mètre de la pompe à l'extérieur des périodes d'échantillonnage, afin d'obtenir la densité spectrale et le niveau de pression acoustique large bande (100 à 1500 Hz). Cette dernière était de 139 dB re 1 µPa à la source, une intensité sonore à laquelle les poissons sont sensibles.

1.8.4 Taille corporelle et abondance

Les photos prises de chacun des échantillons ont été analysées à l'aide du logiciel ImageJ (Schneider et al., 2012). L'ensemble des larves de poissons présentes dans chacun des échantillons a été dénombré et mesuré afin d'obtenir les abondances et les distributions en taille. À partir de ces mesures, la section expérimentale a été divisée en deux : les sorties à forte abondance, composées des sites où des larves plus petites et plus abondantes ont été capturées, et les sorties à faible abondance, composées des sites où des larves plus grandes et moins abondantes ont été capturées. Pour les sorties à forte abondance, les larves ont été séparées en quatre classes de taille, [5.37; 10.85[mm, [10.85; 12.09[mm, [12.09; 13.38[mm, et [13.38; 21.14[mm, qui représentent les quartiles de la distribution de taille corporelle de l'expérience. Pour les sorties à faible abondance, la mesure de taille corporelle de chacune des larves capturées a été analysée individuellement.

1.8.5 Identification des larves

Finalement, l'identification des espèces de larves issues de sorties à forte abondance a été réalisée à l'aide de la méthode de codage à barres de l'ADN (*DNA metabarcoding*). Les larves dans chacun des échantillons ont ensuite été broyées au mortier, en maintenant le plus possible des conditions stériles (p.ex. lavage du mortier et des outils à l'éthanol entre chaque échantillon). Les tissus broyés ont été congelés dans des contenants stériles de 1,5 ml puis envoyés au laboratoire *Génome Québec* pour l'extraction de l'ADN à l'aide d'une trousse Qiagen *Blood and Tissue Kit*. Le matériel génétique a été amplifié via une réaction en chaîne par polymérase (PCR) à l'aide des amorces universelles MiFish-U (Miya et al. 2015), conçues pour cibler un fragment du gène mitochondrial 12S rRNA, spécifique aux vertébrés aquatiques. Le codage à barres de l'ADN utilisant le gène 12S est une méthode d'identification d'espèces de poissons standard pour les communautés du Saint-Laurent (e.g. García-Machado*et al*. 2021; Astorg*et al*. 2025). Le

séquençage a été réalisé avec une plate-forme *Illumina NextSeq PE300*. Les données de séquençage ont été analysées avec le *pipeline* bioinformatique BARQUE (Mathon et al., 2021) et la base de données de référence MitoFish (Zhu et al., 2023). Les résultats issus de ces identifications, montraient que les familles, et donc les groupes de spécialisation auditive, étaient fortement agrégées spatialement et temporellement. En effet, les échantillonnages comportaient soit uniquement la famille des Percidae (Groupe B), soit la combinaison des familles Percidae et Catostomidae (Groupe G) (**Tab. 1.2**). Les résultats d'identification ont permis de séparer les échantillonnages selon la famille des larves capturées. Ensuite, les larves de poissons issues de sorties à faible abondance ont toutes été identifiées individuellement à l'aide de clés taxonomiques (Gouvernement du Québec, 2025). Ainsi, ces larves ont toutes été associées à leur propre taille corporelle, groupe de spécialisation auditive et zone de capture.

CHAPITRE II

FISH LARVAE AUDITIVE CAPACITY AND THEIR RESPONSE TO ANTHROPOGENIC SOUNDS

L'article scientifique suivant sera soumis au *Journal of Animal Ecology*

2.1 Abstract

In freshwater habitats, sound pollution is a pervasive yet understudied stressor for fish communities. Studies on adult fish have reported behavioural responses such as negative phonotaxis and avoidance of habitats exposed to motorboat sound. Few studies, however, have considered the more vulnerable larval stage, even though fish larvae rapidly acquire hearing sensitivity and may display phonotactic responses to natural ambient sounds. Here, we combine a literature review and a field experiment to test the effects of anthropogenic sound on freshwater fish larvae. We first compiled all available audiogram-derived hearing thresholds for freshwater fish larvae and related them to individual body size and species-level auditory specialization. We found that larvae of all species had similar auditory thresholds at the smallest body-size interval, but that species with auditory specializations reached lower thresholds than species without such specializations as they increased in length. We then conducted a sound-addition experiment in a large fluvial lake in Québec, Canada, where adult fish responses to motorboat sound had previously been described. We quantified larval abundance in control and sound-exposed zones and tested whether individual body size and species-level auditory specialization influenced phonotactic responses. We found that fish larvae generally displayed positive phonotaxis towards the sound treatment, suggesting that continuous anthropogenic sound could create an ecological trap. This response was most pronounced in larger-bodied larvae from species with auditory specializations, consistent with the hearing-threshold patterns identified in our literature review. Our findings underscore the importance of studying the impacts of anthropogenic sound across different fish life stages.

Key words: Fish ecology, sensory ecology, sensory pollution, functional traits, ontogeny

2.2 Introduction

Extirpation rates of freshwater fish species in the Anthropocene are more than one-hundred times higher than background rates (Vardakas *et al*., 2025). The decline of fish populations has been correlated to various factors such as habitat loss (Barletta *et al*., 2010), overfishing (Allan *et al*., 2005), chemical pollution (Hamilton *et al*., 2016) and climate change (Rijinsdorp *et al*., 2009). Many studies have also highlighted the extent to which aquatic ecosystems are increasingly exposed to acoustic pollution by anthropogenic sounds (e.g., Popper & Hastings, 2009; Popper & Hawkins, 2019; Whitfield & Becker, 2014). Anthropogenic sounds are especially pervasive in aquatic ecosystems and are known to impact species such as marine mammals (Duarte *et al*., 2021). Nevertheless, the impact of anthropogenic sounds on fish communities remains one of the least studied stressors, particularly in freshwater environments (e.g., Pleizer *et al*., 2025; Mickle & Higgs,2017; Velde *et al*., 2024).

Exposure to anthropogenic sounds triggers a range of behavioural and physiological responses in fish (e.g., Cox *et al*., 2018; Popper & Hastings, 2009; Whitfield & Becker, 2014). For example, anthropogenic sounds can interrupt activities such as territorial defence and foraging (Nedelec *et al*., 2016; Picciulin *et al*., 2010; Slabbekoorn *et al*., 2010). Other studies suggested that sound pollution can reduce egg survival, adult reproduction and growth (Cox *et al*., 2018; Holt & Johnston, 2015; Popper & Hastings, 2009), while also hindering communication, orientation, and prey detection (Holt & Johnston, 2011; Popper & Hawkins, 2019; Slabbekoorn *et al*., 2010). Recent studies have also shown that some fish species display negative phonotaxis in response to anthropogenic sounds (Barbeau *et al*., 2024; Nedelec *et al*., 2016; Pieniazek*et al*., 2010). Phonotaxis is the movement of an organism in response to a sound source, which can be attractive (positive phonotaxis), neutral, or repulsive (negative phonotaxis).

It has been proposed that the phonotaxic response of fish to anthropogenic sounds is determined, at least in part, by their auditory sensitivity (e.g., Barbeau *et al*., 2024). Fish auditory sensitivities are often assessed using audiograms, which indicate the ability to detect sounds of a given frequency (kHz) and amplitude (dB). Historically, fish were separated into two groups based on their auditory system: the generalists and the specialists (Amoser & Ladich, 2003). All fish can detect the particle motion component of the sound wave with their inner ear, but specialists could also detect efficiently the pressure component. More recently, a broader spectrum of auditory specializations has been recognized (Popper & Fay, 2011; Popper*et al*., 2022; Wiernicki*et al*., 2020). Popper*et al*. (2022) proposed a framework with seven specialization groups in increasing order of auditory sensitivity. The first two groups include generalist fish: (1) without a swim bladder, and (2) with only a swim bladder. The next five groups include specialist fish with: (3) a swim bladder extension, (4) isolated bullae or similar structures (e.g., labyrinth organs) next to the inner ear, (5) auditory bullae connected to the inner ear, (6) swim bladder extensions connected to the inner ear, and (7) a Weberian apparatus. Although this framework was meant to help derive sound-exposure criteria on fish, these may not apply to early life stages such as eggs and larvae (e.g., Popper *et al*., 2014).

In fish larvae, sensitivity to sounds is modulated by the ontogeny of their auditory specializations. The literature on this topic suggests that auditory sensitivity increases with larval body size (Blaxter & Bratty, 1985; Fuiman *et al*., 1999; Iwashita, 1999; Lu & Desmith, 2013; Sisneros & Bass, 2005). However, it remains unclear how auditory specializations affect the relationship between growth and audition. Each auditory specialization is associated with a unique developmental rate; for example, the inner ear (Vasconcelos *et al*., 2016), the swim bladder (Doroshev *et al*., 1981), and the labyrinth organ (Wysocki & Ladich, 2001) are functional in the

larvae shortly after their birth. The auditory system of generalist larvae and of specialists with a labyrinth organ is functional and complete early during development. In contrast, the four ossicles of the Weberian apparatus are not yet distinguished from the vertebrae at birth (Rosen & Greenwood, 1970). In the zebrafish, *Danio rerio*, the last of the ossicles is not fully formed until 56 days post-fertilization and their ossification continue at the adult stage (Grande & Young, 2004). Likewise, fish auditory specializations originating from a modification of the swim bladder, such as swim bladder extensions and auditory bullae, develop progressively after hatching (e.g., Vieira *et al*., 2023; Birindelli *et al*., 2009). Thus, both ontogenetic development and auditory specializations are expected to affect the hearing threshold and phonotaxis of fish larvae.

Behavioural studies have shown that marine fish larvae display positive phonotaxis to natural ambient sounds (Gordon *et al.*, 2019; Leis *et al.*, 2011; Radford, Stanley *et al.*, 2011; Radford, Tindle *et al.*, 2011). For instance, in the study by Simpson *et al.* (2004), fish larvae from Pomacentrid and 12 other families were attracted to reef sounds, allowing them to settle in favourable habitats. However, to our knowledge, only five studies have investigated the phonotaxic response of fish larvae to anthropogenic sounds. In the study by Simpson *et al.*(2016), larvae avoided playbacks of motorized sounds, while no systematic phonotaxis responses were observed in Waddell & Sirovic (2023), Jung & Swearer (2011), and Holles *et al.*(2013). The study by Cresci *et al.* (2023) showed that larvae display positive phonotaxis to wind-farm underwater sounds, and Jung & Swearer (2011) reported a similar response in larvae exposed to harbor sounds. Overall, the handful of studies that investigated the phonotaxic response of fish larvae to anthropogenic sounds produced conflicting results. A consideration of species' auditory specializations and fish developmental status (age, or body length) could help settle these differences. Furthermore, studies on the effect of anthropogenic sounds on fish larvae in freshwater

ecosystems are critically needed.

The main objective of the paper is to evaluate the effect of body length and auditory specializations on the hearing thresholds and phonotaxic responses of freshwater fish larvae to anthropogenic sounds. First, we hypothesized that larval hearing thresholds decrease with increasing body length, but that this negative relationship is steeper in groups having either a swim bladder modification or a Weberian apparatus due to the longer development time of their specialized auditory systems. Second, we hypothesized that larvae with auditory specializations will display a stronger negative behaviour to anthropogenic sounds, but that this effect is more pronounced at increased body lengths. To address these objectives, we combined a synthesis of published hearing thresholds of fish larvae with an *in-situ* sound-exposure experiment evaluating the phonotaxis of fish larvae to anthropogenic sounds in their natural environment. The field experiment was conducted in a fluvial lake with a diverse fish community facing multiple stressors, including anthropogenic sounds (Mingelbier *et al*., 2023).

2.3 Methods

2.3.1 Classification of auditory specializations

We adapted the auditory specialization groups proposed by Popper *et al*. (2022) to account for fish larvae development. Since auditory specializations derived from a modification of the swim bladder take a longer time to develop (e.g., Vieira *et al*., 2023), we combined fish species in these groups into a single category. Therefore, we retained five specialization groups. The two generalist groups include species without a swim bladder (NSB) or with a swim bladder only (SBO), whereas the three specialist groups include species with a labyrinth organ (LBO), a modified swim bladder (SBM) or a Weberian apparatus (WEB). For present purposes, we use the

generalist vs. specialist terminology to reflect the absence or presence of auditory specializations, and not to describe hearing sensitivities *per se* (Popper *et al*., 2022).

2.3.2 Literature synthesis: effect of size and specialization on hearing thresholds

To address the first objective, we screened scientific literature for studies that reported audiograms of fish larvae using the following keywords: *Ontogeny*, *hearing threshold*, and *fish larvae.* From each study, we extracted from figures and tables the hearing threshold (Sound Pressure Level, or SPL in dB re. 1 µPa) measured at four commonly tested frequencies: 100, 200, 400, and 800 Hz. We also noted the length of the larvae (mm), the species, and the auditory specialization group: either SBO, SBM, WEB, or LBO (no audiogram was found for the NSB group). We assigned larvae to five non-overlapping body length intervals: [5, 15[mm, [15, 25[mm, [25, 35[mm, [35, 45[mm, and [45, 55[mm, which were then analyzed using the median value of the interval. We used length intervals instead of continuous measures because some of the studies used binned values.

We fitted linear mixed models (LMMs) with hearing threshold as the response, larval body length, specialization group, and their interaction as fixed effects, with study ID as a random effect on the intercepts. We fitted separate LMMs for each sound frequency. We evaluated the fixed effects using type II Wald Chi-square tests. We adjusted LMMs with the *glmmTMB* package (Brooks *et al*., 2017), using the *glmmTMB* function with a Gaussian error distribution. We also used the function *simulate.Residuals* from the *DHARMa* package (Hartig, 2024), which checks for heteroscedasticity. We allowed residual variances to differ between specialization groups by adding the parameter *dispformula*. We confirmed that models considering heterogeneous dispersion of residuals presented a better fit using the *anova* function. We performed all statistical analyses in R version 4.4.2 (R Core Team, 2024).

2.3.3 Field experiment: effect audition on the response to anthropogenic sounds

We conducted the experiment in the littoral zone of fluvial Lake Saint-Pierre, an enlargement of the St. Lawrence River in Québec, Canada. Lake Saint-Pierre is a freshwater biodiversity hotspot recognized as a biosphere reserve by the UNESCO (2000) and a wetland of international importance by the RAMSAR Convention (1998). Its fish community comprises over 70 species, including species from all auditory specialization groups except LBO. Lake Saint-Pierre is also a major waterway with significant boat traffic related to shipping vessels, fishing and recreational activities implying various motorizations (Laporte *et al*., 2025; Mingelbier *et al*., 2023).

We conducted phototaxis trials at night in shallow (water depth between 0.5 to 1 m) portions of the lake on its northern shore. Each trial included a sound treatment zone and a control zone without sound addition. We sampled larvae using light traps (Quadratoil, WaterMark, Jackson, USA), with two traps positioned in each zone. The light traps in each zone were floating 2m apart. They were equipped with green glow sticks (Chemical Lightstick, Cyalume, West Springfield, USA), which is the colour attracting the most fish species (Reynalete-Tataje *et al*., 2024). The control and treatment zones were within the same site, separated by a distance varying between 100 m and 150 m. A device was added to the treatment zone, which produced continuous underwater sounds for one hour without interruption (see details below). We confirmed using hydrophone recordings that the sound treatment did not propagate beyond 50m in this shallow lake system. We conducted two trials at two distinct sites on each sampling night. We set up the light traps, the hydrophones, and the sound sources at least 1h before nightfall. The trials started 30 minutes after daylight (i.e. astronomical twilight) by inserting the light sticks and starting the devices. At the end of the trials, we immediately retrieved and anaesthetized the fish larvae caught

in the light traps. In total, we sampled 21 nights (42 trials), with 12 nights in spring and summer 2024 and 9 nights in spring 2025. Larvae were caught in 17 out of 21 nights, resulting in a final dataset of 34 experimental trials (**Table 2.1**). The protocol followed guidelines from Québec ministry of wildlife (permit 2025032101404SP).

The anthropogenic sound source was a motorized transfer pump (M12 Stick Transfer Pump, Milwaukee Tool, Brookfield, USA) attached to a metal rod inserted into the sediment. We recorded the acoustic environment in sound treatment and control zones using HydroMoth recorders (Open Acoustic Devices, Oxford, UK), hanging 0.3m below the surface and anchored approximately 1m away from the sound source in the treatment zone, or between the two light traps in the control zone. We set the HydroMoth units at high gain, with a sampling rate of 48 kHz, a recording time of 1-minute per cycle, followed by a 3-minute sleep period. For each experiment and zone (control vs sound), we aggregated the 1-minute clips into one audio file. These audio files were the analysed in R version 4.4.2 (R Core Team, 2024) with the *Seewave* package (Sueur *et al*., 2025), using the *meanspec* function to obtain the mean frequency spectrum (default parameters, no normalization) and the *fpeaks* function to extract peak frequencies and corresponding amplitudes (A). Amplitudes at peak frequency were transformed to a decibel scale (dB) as follows: $dB = 20\log(A)$. Finally, for each trial we calculated the difference in decibels at peak frequency between treatment and control zones (ΔdB) as a measure of the sound treatment above background.

We recorded sounds produced by our device at 1m distance from the source, at a sampling rate of 44.1 kHz, using a H1 hydrophone and a PA4 amplifier (Aquarian Scientific, Anacortes, USA) connected to a data logger (H2n Handy Recorder, Zoom, Tokyo, Japan). The setup generates a gain of 20 dB, has a maximum input of 10V (rms) and a sensitivity of −190 dB re 1 V/µPa over

the frequency range of 10–3000 Hz (Barbeau *et al*., 2024; Kacem *et al*., 2020; Roca *et al*., 2018). We calculated the root-mean-square broadband (100 to 1500 Hz) sound pressure level (SPL re. 1 µPa) using the PAMGuide functions (Merchant *et al*., 2015). This frequency band corresponds to the hearing range of most fish species. We visualized the power spectral density at 5 Hz intervals using a 50% Hann smoothing window. Our sound treatment over the 100 to 1500 Hz range generated a broadband SPL of 139 dB re.1 µPa.

The anthropogenic sounds measured *in situ* by the HydroMoths in the treatment zones had, in average, a peak frequency of 523.6 ± 65.3 Hz, whereas the average difference in decibels at peak frequency between control and treatment zones (ΔdB) was 22.6 ± 2.1 dB (**Figure 2.1A**). HydroMoth recordings were collected at slightly different distances from the anthropogenic sound source (1.5–2.5 m) and captured natural fluctuations in both ambient and treatment sounds, as well as occasional nuisance noise caused by rubbing and signal clipping. A more detailed analysis of the sounds produced by the motorized device using the H1 hydrophone-PA4 amplifier reveals a complex sound structure with multiple peak frequencies around 400, 750 and 1500 Hz and a broadband SPL of 139 dB re.1 µPa (**Figure 2.1B**). This anthropogenic sound is well within the range of underwater sounds produced by human activity in freshwater lakes and rivers (**Figure 2.1C**).

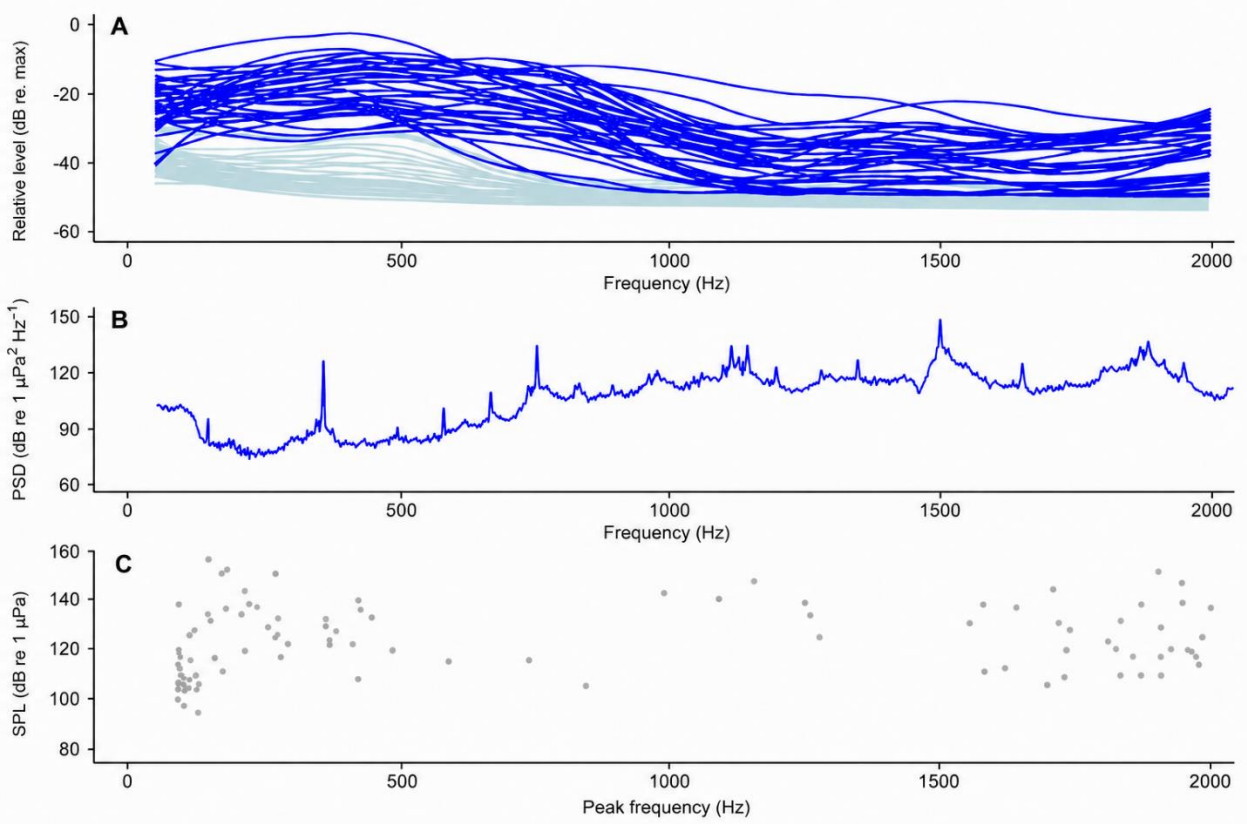


Figure 2.1. Characterization of the anthropogenic sound treatment within the frequency range most relevant to fish hearing (50–2000 Hz). (A) Power spectra of HydroMoth recordings expressed as relative sound levels (dB; maximum = 0 dB). Dark- and light-blue lines represent the treatment and control zones, respectively. (B) Power spectral density of the anthropogenic sound treatment recorded with an H1 hydrophone connected to a PA4 amplifier at 1 m from the source. (C) Anthropogenic acoustic events (n = 98) recorded with the same H1 hydrophone–PA4 amplifier setup in different water bodies across Quebec, Canada, at varying depths and distances from the source (Barbeau et al., 2024). Values for individual acoustic events represent sound pressure levels (SPLs) at their peak frequencies (Hz).

.

After each sampling night, we brought larvae back to the laboratory and combined the captures of the two light traps from the same zone, yielding a total of 68 larval samples (17 nights X 2 trials per night X 2 zones per trial). To count and measure the length of all larvae, we photographed each sample after laying the larvae on a white paper and placing a 10cm reference ruler in the frame. We analyzed each picture with the ImageJ software (Schneider *et al*., 2012).

Because larval abundances varied greatly between experiments, we divided the trials into

two groups, based on the sampling date, number of larvae captured, and mean larval length (**Table 2.1**). The 'peak abundance' group comprised trials in which we captured many small larvae in mid to late May of both years (> 350 larvae by sampling night). In contrast, the 'low abundance' group comprised trials in which we captured fewer (< 60 larvae by night) but larger larvae belonging to a greater diversity of taxa, outside of the period of peak larval recruitment in the study area (**Table 2.1**).

At peak abundance, we tested the effect of body length and auditory specialization on phonotaxis using larvae counts. We defined four size intervals corresponding to the quartiles of the larvae length distribution across all sampling nights (14 trials): [5.37 – 10.85[mm, [10.85 – 12.09[mm, [12.09 – 13.38[mm, and [13.38 – 21.14[mm. For each zone of each trial, we counted the number of larvae captured in each of the four size intervals. To test the relationship between the number of larvae caught (response variable), the experimental zone (treatment or control; fixed effect), larval body length (factor with four levels; fixed effect) and their interaction, we fitted generalized linear mixed models (GLMMs) using the *glmmTMB* function with a type I negative binomial family from the *glmmTMB* package (Brooks*et al*., 2017). We included site ID nested in sampling night as random effects on the intercepts. We used Type II Wald Chi-square tests to assess statistical support.

We used metabarcoding of larval specimens to obtain the species composition of the samples at peak abundance, and thus the prevalence of auditory specialization groups. We thawed the frozen larval samples and crushed them with ethanol-sterilized mortar and pestles. We stored tissue samples in 1.5 mL vials, frozen, which were sent to Génome Québec (Montreal, Canada) for DNA extraction, amplification, and sequencing. DNA was extracted using the QIAGEN DNeasy Blood & Tissue Kit according to the manufacturer's instructions. DNA extracts were

quantified with a Quant-iT PicoGreen dsDNA Assay Kit (Life Technologies). DNA extracts were PCR amplified using the MiFish-U primer set (Miya *et al*. 2015), which is routinely used for fish community surveys in the St. Lawrence River (e.g. García-Machado *et al*. 2021; Astorg*et al*. 2025). The PCR mix contained 3 µl of template DNA, Qiagen PCR buffer (1X final concentration), dNTP mix (0.2 mM final concentration), 0.02 U/µl of HotStarTaq DNA Polymerase (Qiagen), 1.25 µM of BSA, and 0.6 µM of forward and reverse primers. The following thermocycling conditions were used: denaturation at 96°C for 15 min, followed by 40 cycles of 30 s at 96°C, 90 s at 60°C and 90 s at 72°C, followed by a final elongation step of 10 min at 72°C. PCR products were purified with magnetic beads and used in a second, two-step PCR to add sample barcodes and sequencing adapters following the manufacturer's protocol. Libraries were visualized with gel electrophoresis, quantified with PicoGreen dsDNA Assay Kits, and then pooled at equimolar concentrations. The purified pool was then diluted to 700 pM using RSB Tween20. A phiX library was used as control and mixed with libraries at 20% level. The pool was loaded on a P1 NextSeq 2000 lane as per the manufacturer's instructions. The run was performed for 2x300 cycles in paired-end mode. BCL Convert 4.2.4 was then used to demultiplex samples and generate fastq reads. Separate pools were prepared for the 2024 and 2025 samples. We analyzed the sequence data with the BARQUE metabarcoding pipeline (Mathon *et al*., 2021), which includes various programs and scripts for filtering, trimming, merging, splitting, denoising, and annotating raw reads, as well as a built-in 12S reference library where all local freshwater fish species are represented.

Metabarcoding analyses revealed that samples at peak abundance were heavily dominated by one or a few species such as Yellow Perch, *Perca flavescens* (Percidae), and White Sucker, *Catostomus commersonii* (Catostomidae) (**Table 2.1**). We divided the trials into those containing

only Percidae larvae (5 nights, 10 trials) vs. those containing a mixture of Percidae and Catostomidae (2 nights, 4 trials). We fitted separate GLMMs on each group of trials. Larvae of the trials with only Percidae belonged to the swim bladder group (SBO), whereas the other trials also included larvae of the Weberian apparatus group (WEB) that are considered auditory specialists. The use of 40 PCR cycles and a high initial DNA concentration, amplification bias and saturation effects likely prevent reliable inference of species relative abundances based on metabarcoding results only. Therefore, we revisited the sample photographs of the trials containing a mixture of larvae to visually estimate the proportion of WEB (Catostomidae) and SBO (Percidae) in each of the four size intervals.

Low abundance trials covered a greater diversity of species. We were able to identify each larva morphologically to the family level using taxonomic keys (Government of Quebec, 2025) and to assign them to their auditory specialization group. Identifications were confirmed by a professional taxonomist of the Québec ministry of wildlife, and some unknown specimens were also identified using DNA barcoding at a government facility. First, we compared the abundance of larvae belonging to different auditory specialization groups between the two experimental zones by fitting a GLMM (compound Poisson family), including site IDs nested in the sampling nights as random effects. We also compared the body length of larvae between the two experimental zones by fitting a LMM using site IDs nested in the sampling nights, and taxonomic families as random effects. We used the same functions described for peak abundance trials to adjust the model and assess statistical support.

Table 2.1: Descriptive statistics and repartition of sampling nights into the two trial groups: Low or Peak abundance. The table provides the date, larval abundance, mean larval body size, and taxonomic composition of each sampling night. Larvae in each trial group were analyzed using different approaches. Family "Other" regroups fish from five families: Centrarchidae, Clupeidae, Fundulidae, Leuciscidae and Salmonidae.

Sampling	Date	Larvae		Families			Trial group
		Abundance	Mean size	Percidae	Catostomidae	Other	
		Total	(mm ± SD)	(%)	(%)	(%)	
1	2024-05-24	392	13.1 ± 1.6	100	0	0	Peak
2	2024-05-30	654	13.2 ± 2.1	92	8	0	Peak
3	2024-05-31	673	12.9 ± 2.0	65	35	0	Peak
4	2024-06-05	10	18.4 ± 6.2	80	20	0	Low
5	2024-06-17	57	18.5 ± 4.4	79	9	12	Low
6	2024-06-21	4	17.1 ± 3.4	0	50	50	Low
7	2024-06-24	7	16.2 ± 4.7	0	14	86	Low
8	2024-07-04	2	17.7 ± 3.3	100	0	0	Low
9	2024-07-09	7	17.5 ± 6.6	0	0	100	Low
10	2024-07-26	10	24.4 ± 6.6	0	0	100	Low
11	2024-08-12	6	26.8 ± 7.1	0	0	100	Low
12	2024-08-26	3	18.0 ± 5.6	0	0	100	Low
13	2025-05-12	9	16.9 ± 4.9	0	0	100	Low
14	2025-05-22	496	9.8 ± 1.6	100	0	0	Peak
15	2025-05-23	419	10.8 ± 1.5	100	0	0	Peak
16	2025-05-26	1285	12.2 ± 1.5	100	0	0	Peak
17	2025-05-27	1204	12.3 ± 1.7	100	0	0	Peak

2.4 Results

2.4.1 Literature synthesis: effect of size and specialization on hearing thresholds

We analyzed published audiograms to evaluate the effect of body length and auditory specialization on the hearing thresholds of fish larvae (**Figure 2.2**). Our dataset included 22 fish species (15 SBO, 3 WEB, 3 SBM & 1 LBO) from 16 different studies (**Appendix A**). The interaction between body length and auditory specializations was statistically supported at all four

tested frequencies: 100Hz ($\chi^2 = 10.89$, $p = 0.012$), 200Hz ($\chi^2 = 9.69$, $p = 0.021$), 400Hz ($\chi^2 = 11.64$, $p = 0.009$), and 800Hz ($\chi^2 = 13.73$, $p = 0.003$). Hearing thresholds decreased with increasing larval body length in every specialization group (**Figure 2.2**; **Appendix B**). However, the negative relationship between body length and hearing threshold was particularly steep for the WEB and SBM groups, with much flatter slopes observed for the SBO group at all frequencies. The slope of the LBO group, represented here by one species with the labyrinth organ, was also relatively flat (**Figure 2.2**). Hearing thresholds of the LBO larvae in the smallest size interval were more than 20 dB lower than the thresholds of larvae in the other three groups, reflecting their enhanced hearing sensitivity at birth (**Figure 2.2**). In contrast, the hearing thresholds of the SBO larvae in the largest size intervals were consistently higher, especially at 100 and 200 Hz (**Figure 2.2**).

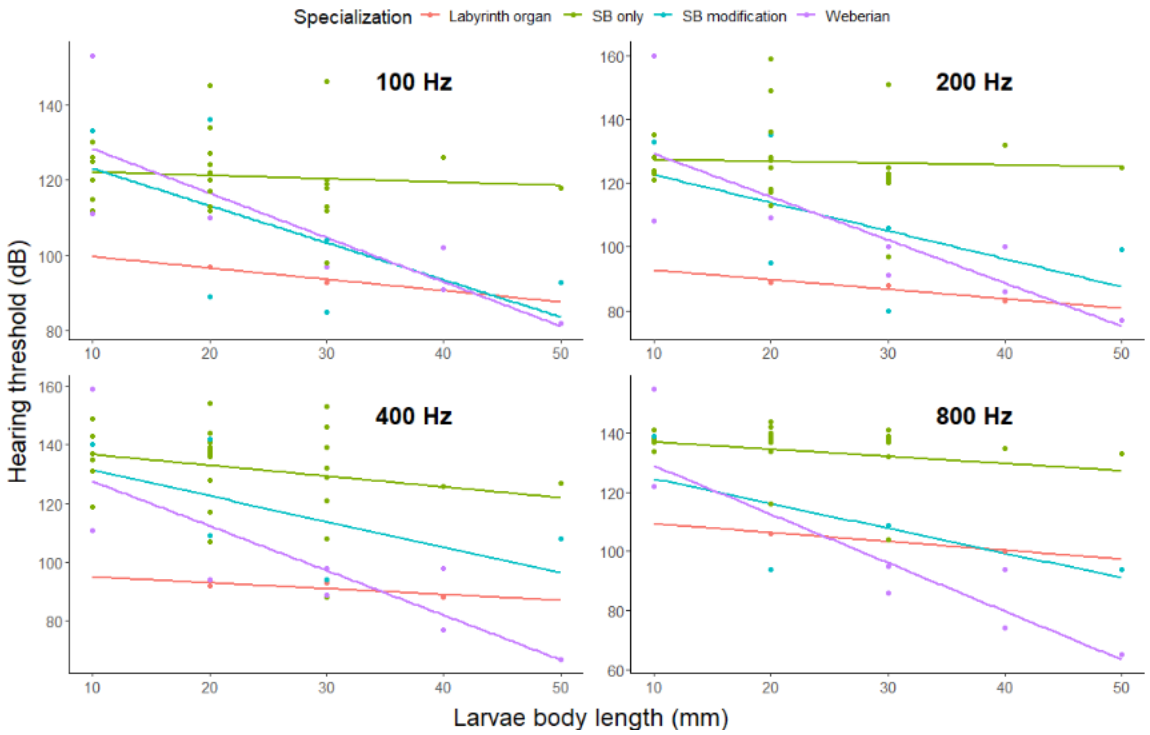


Figure 2.2: Hearing thresholds of fish larvae from the different auditory specialization groups in relation to body length. Hearing thresholds are reported at 100 Hz (n=42), 200 Hz (n=42), 400 Hz (n=45), and 800 Hz (n=38) from larvae belonging to four specialization groups: LBO (Labyrinth organ, red), SBO (Swim bladder only, green), SBM (Swim bladder modification, aqua), and WEB (Weberian apparatus, purple). The dataset covers 22 fish species from 16 studies. Body length intervals are represented by their median values.

2.4.2 Field experiment: effect of audition on the response to anthropogenic sounds

We replicated our experimental design in 34 sites across 17 sampling nights, with each site comprising one sound treatment zone and one control zone. In the peak abundance trials, we captured a total of 5123 larvae at 14 sites across 7 sampling nights. We observed only two of the specialization groups in this experiment: SBO (Percidae: Mostly *Perca flavescens*, but also some *Percina caprodes/copelandi*) and WEB (Catostomidae: *Catostomus commersonii, Catostomus catostomus, Moxostoma macrolepidotum*, and *Carpiodes cyprinus*). We captured only Percidae larvae (SBO) in 10 trials and a mixture of Percidae and Catostomidae larvae (WEB) in four trials.

For these four trials, we went back to the photographs used for body length and abundance measurements to estimate the proportion of each family. We observed the dominance of Catostomidae larvae (62%) in the largest body length interval (13.38 to 21.14 mm), but a dominance of Percidae larvae (66%) in the second largest interval (12.09 to 13.38 mm). In the smaller body length intervals (< 12.09 mm), the classification relied on a low number of larvae and was inconclusive in most cases (56%) due to their small sizes.

We included all 14 trials of peak abundance to test for the effect of body length, sound treatment, and their interaction, on the abundances of larvae, irrespective of auditory specializations. We predicted that abundances would decrease for larger larvae in presence of anthropogenic sounds (i.e., negative phototaxis increases with development time). In contrary to our prediction, we observed a positive relationship of both body length ($\chi^2 = 10.95$, $p = 0.012$) and sound treatment ($\chi^2 = 12.37$, $p < 0.001$) on larval abundances (**Figure 2.3A**). Although the effect of the sound treatment appears more pronounced for the larger larvae, the interaction was not statistically supported ($\chi^2 = 5.99$, $p = 0.113$) (**Figure 2.3A**). When only considering the 10 trials with 100% of Percidae larvae (SBO), body length did not affect the abundance of larvae directly ($\chi^2 = 2.47$, $p= 0.482$), nor in interaction with the sound treatment ($\chi^2 = 0.57$, $p = 0.904$; **Figure 2.3B**). However, Percidae larvae were consistently more abundant in the sound treatment zone ($\chi^2 = 12.96$, $p < 0.001$), suggesting positive phonotaxis irrespective of larvae length.

We also predicted that abundances would decrease for larvae with auditory specializations in presence of anthropogenic sounds (i.e., negative phototaxis increases with auditory sensitivity), especially among larger larvae. When considering the 4 trials with a presence of Catostomidae in the samples (i.e., WEB specialization group), we observed a significant interaction between body length and sound treatment ($\chi^2 = 29.20$, $p < 0.001$). The abundances of large-bodied larvae (14 to

21 mm) in the sound-treatment zone were five times higher than in the control zone, whereas the abundances of smaller larvae (< 14 mm) were comparable (**Figure 2.3C**). These results suggest that larvae of the WEB specialization group, which dominate at the largest size interval, also display positive phonotaxis.

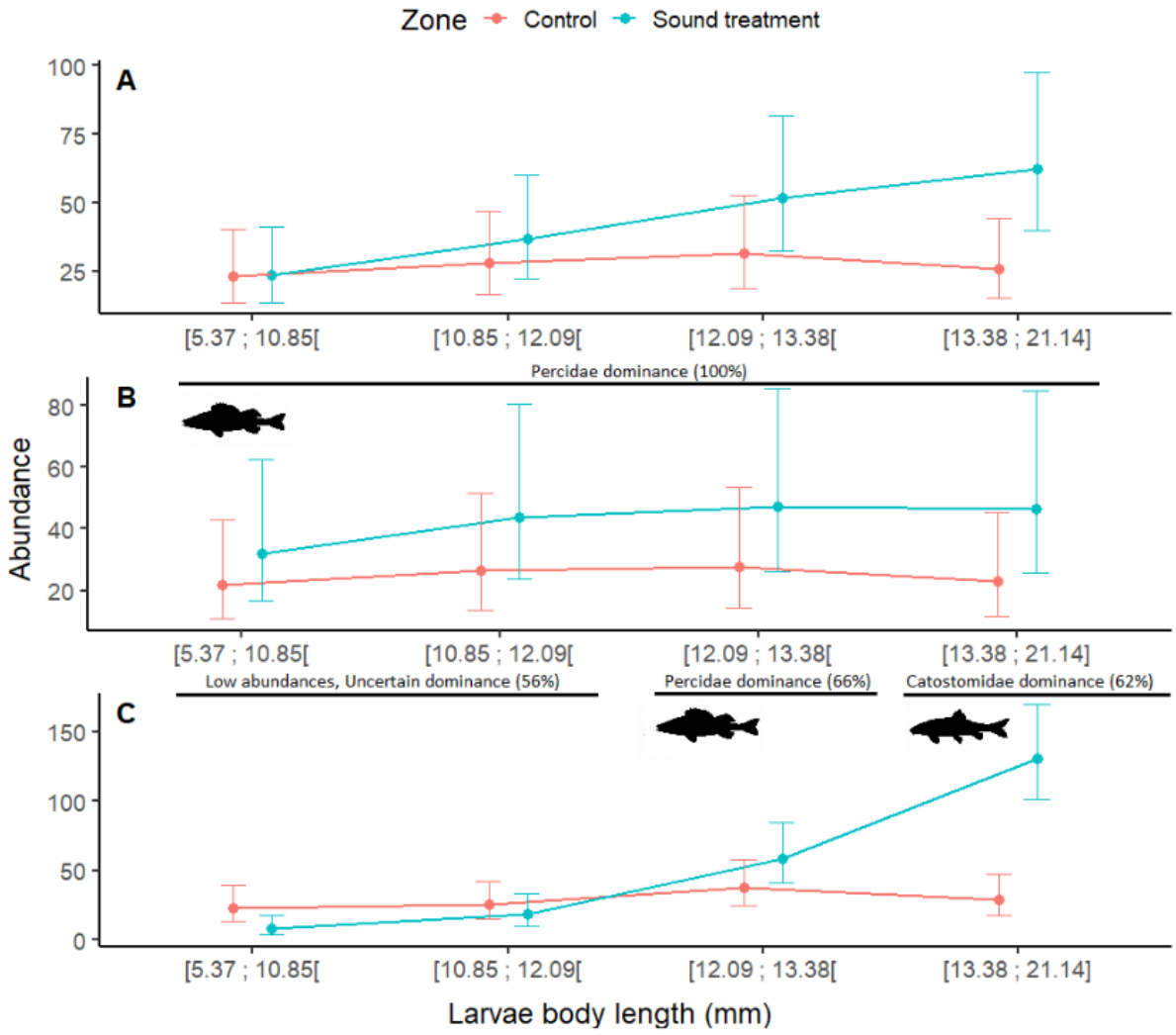


Figure 2.3: Effect of body length and sound treatment on fish larvae at peak abundances. Abundance of larvae from peak abundance trials in: (A) all sites combined, (B) in sites in which only Percidae (SBO group) were caught, and (C) in sites in which both Percidae and Catostomidae (WEB group) were caught. Abundances are divided into four size classes, [5,37; 10,85[mm, [10,85; 12,09[mm, [12,09; 13,38[mm, and [13,38; 21,14[mm, which represent the four quartiles of the body length distribution of larvae across all peak abundance trials.

In the low abundance trials, we captured a total of 115 larvae at 20 sites across 10 sampling nights. The larvae were larger on average and covered seven taxonomic families including four groups of auditory specialization: NSB (n=7 Fundulidae), SBO (n=15 Centrarchidae, n=55 Percidae, n=7 Salmonidae), SBM (n=5 Clupeidae), and WEB (n=10 Catostomidae, n=14 Leuciscidae) (**Appendix C**). We aggregated NSB and SBO groups into the generalists (n=84), while aggregated WEB and SBM groups into the non-LBO specialists (n=19) for subsequent analyses.

We tested the effects of the experimental zone on the abundance of larvae caught (**Figure 2.4A**) and on their body length (**Figure 2.4B**) in the low abundance trials. For larvae without auditory specializations, we found a significantly higher abundance in the sound treatment zone ($\chi^2 = 5.05$, $p = 0.025$), while we found no effect of the body length ($\chi^2 = 0.26$, $p = 0.607$). These results suggest that generalist fish larvae display a positive phonotaxic response to the anthropogenic sound treatment, irrespective of body length. For non-LBO specialist, we found no difference in abundance between experimental zones ($\chi^2 = 0.02$, $p = 0.901$). However, body length was significantly higher among larvae caught in the sound treatment zone ($\chi^2 = 4.34$, $p = 0.037$), suggesting that only larger-bodied auditory specialists show positive phonotaxis. Results obtained in the low abundance trials corroborate those of the peak abundance trials.

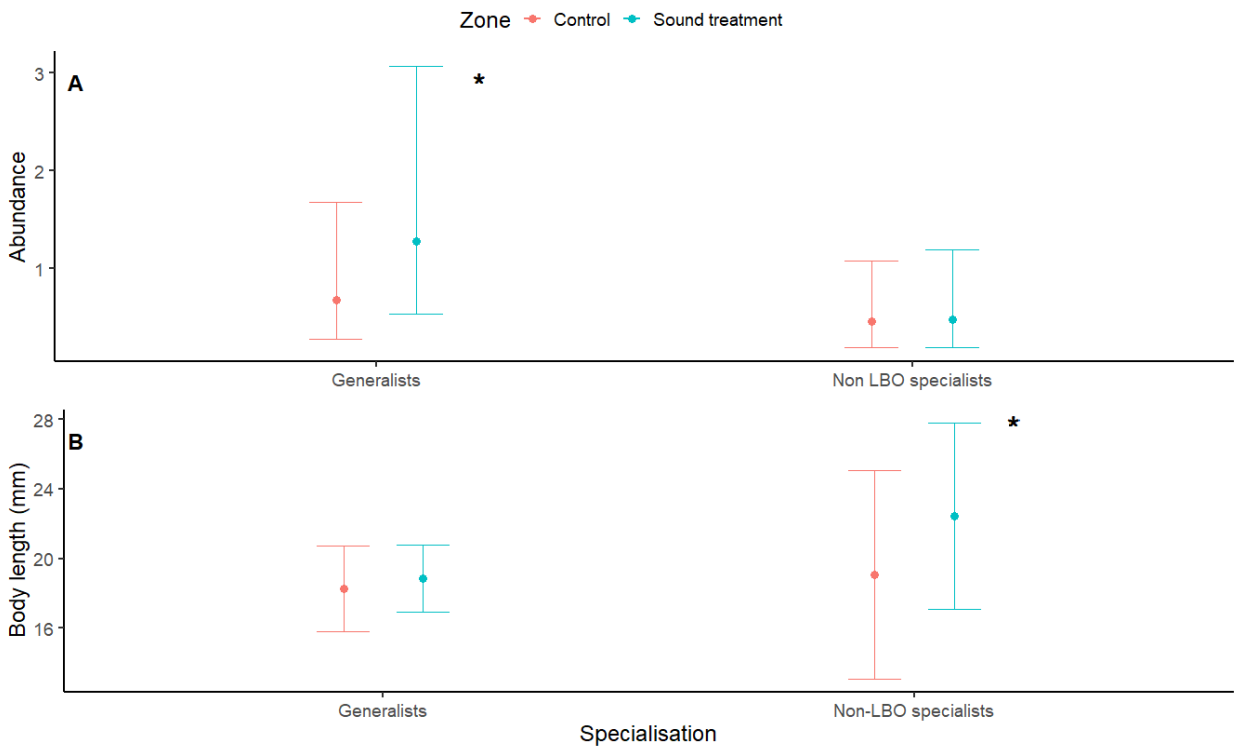


Figure 2.4: Effect of auditory specialization and sound treatment on fish larvae in low abundance trials. Larvae from low abundance trials were classified as auditory generalists or non-LBO specialists. Effects of the sound treatment on larvae abundance (A) and body length (B) were tested separately. The * mark indicates the presence of a statistical difference at alpha 0.5.

2.5 Discussion

Anthropogenic sounds in aquatic habitats have wide-ranging consequences for fish communities. Some fish species display negative phonotaxis away from anthropogenic sounds at the adult life stage, a response modulated by their hearing sensitivity (Barbeau *et al*., 2024). However, larval stages may not show the same phonotaxic patterns. In this study, we show that 1) the hearing sensitivity of fish larvae at all acoustic frequencies increases with body length, but only in species with underdeveloped auditory specializations at birth (WEB and SBM specialization groups), 2) fish larvae are captured in greater abundance in experimental zones exposed to continuous anthropogenic sounds, although their ontogenetic responses differ between auditory specialization groups.

2.5.1 Literature synthesis: effect of size and specialization on hearing thresholds

We first described the effects of auditory specialization and body length on the hearing sensitivity of fish larvae. To do so, we synthesized published audiograms performed on fish larvae. We predicted that hearing sensitivity would increase with growth, but also that this relationship would be steeper in auditory specialization groups requiring longer development time, such as SBM and WEB. As predicted, the hearing threshold of fish larvae decreased (hearing sensitivity increased) with increasing body length. This relationship is already documented to some extent in the literature (Blaxter & Bratty, 1985; Fuiman *et al*., 1999; Iwashita, 1999; Lu & Desmith, 2013; Sisneros & Bass, 2005). Our results therefore support the general hypothesis that auditory sensitivity increases during early ontogeny as hearing thresholds decreased with larval body length. We also found differences in the ontogeny of hearing thresholds between groups of auditory specialization. Body length had a weak effect on the hearing of larvae in the SBO (swim bladder only) and LBO (labyrinth organ) groups, but a strong effect on the hearing of larvae from the SBM (swim bladder modification) and WEB (Weberian apparatus) groups. Indeed, growth in size did not impact larval hearing sensitivity the same across specialization groups and this discrepancy could be explained by the nature of the auditory systems, alongside the different development time they require. Larvae of the SBO and LBO groups have an auditory system that is functional shortly after hatching. Indeed, the inner ear is present at birth (Vasconcelos *et al*., 2016), the swim bladder inflates a few days after birth (Doroshev *et al*., 1981), and the labyrinth organ is fully formed in the first post-hatching weeks (Wysocki & Ladich, 2001). In contrast, the auditory system of larvae in the SBM and WEB groups takes longer to develop. Neither the swim bladder modifications (Vieira *et al*., 2023) nor the Weberian apparatus is present at birth (Rosen & Greenwood, 1970). In some documented cases, these auditory specializations are fully

functional only at the juvenile stage (Birindelli *et al*., 2009; Grande & Young, 2004). This delayed effect likely explains the steeper improvement of hearing sensitivity observed in SBM and WEB groups as the progressive development of their specialized structures enhances sound detection.

The presence of auditory specializations influenced the hearing threshold of larvae. When considering larvae in the larger size intervals, the hearing thresholds of the SBO group were 20-40 dB above the thresholds measured in groups with an auditory specialization (i.e., LBO, SBM and WEB). In the smaller size intervals, SBO, SBM, and WEB groups all had similar hearing thresholds. The hearing thresholds of LBO larvae across all size intervals remained approximately 20-40 dB below those of larvae in the SBO group. These results confirm that the presence of a developed auditory specialization does also strongly affect hearing sensitivity in fish larvae, which was previously shown in adults (Popper *et al*., 2022). However, determining when auditory specializations become functional during larval development remains crucial to understanding larval hearing. Whereas these specializations appear to become functional shortly after hatching in the LBO group, our results suggest that functionality is reached at a body length of approximately 20 mm in the other two specialized groups (SBM and WEB).

The framework describing the range of auditory specializations in adult fish (e.g. Popper *et al*., 2022) might not be best suited for fish larvae. Our results suggest that fish larvae could be classified into three main categories (**Figure 2.5**). The ‘Unspecialized’ group is characterized by larvae with higher hearing thresholds that are weakly affected by growth. Larvae of the ‘Early-specialized’ group have a fully functional auditory system early after hatching and low hearing thresholds (i.e., high hearing sensitivity) that are not affected by growth. Finally, larvae of the ‘Late-specialized’ group have auditory systems with a longer development time, leading to a rapid decrease of hearing thresholds with increasing body length post-hatching. This classification could

be used to assess the vulnerability of larvae from different groups of auditory specialization at different periods post-hatching, in line with other studies assessing vulnerability to anthropogenic stressors across the complete life cycle of an animal (e.g. Dahlke *et al*. 2020).

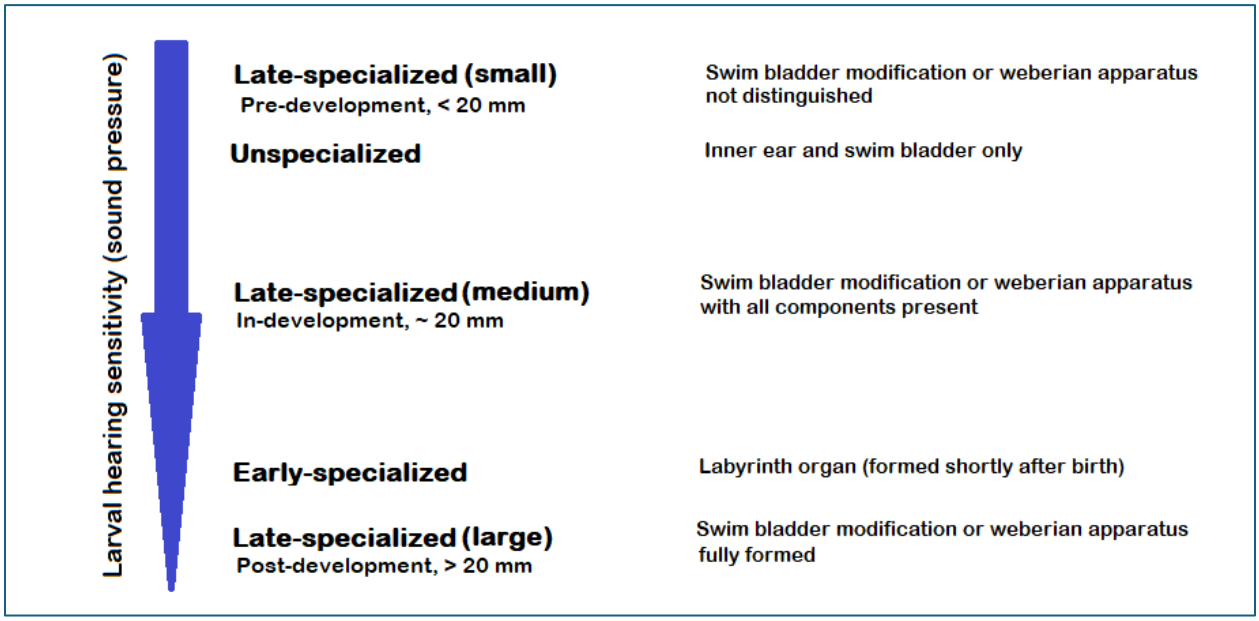


Figure 2.5: Classification of hearing sensitivity in larval bony fish. This classification distinguishes species without auditory specializations (Unspecialized) from those that develop their auditory system early (Early-specialized) versus late (Late-specialized) after hatching. The body length cutoff of 20 mm is given as a rough figure on the basis of results from the present study and might not be representative of every species.

2.5.2 Field experiment: effect of audition on the response to anthropogenic sounds

We conducted an experiment to evaluate if fish larvae would be captured in lower abundances when exposed to anthropogenic sound. To do so, we compared larvae caught using light traps in two experimental zones (control and sound treatment). Since some adult freshwater fish tend to avoid underwater anthropogenic sounds (e.g., Barbeau *et al*., 2024; Tan *et al*., 2025), we predicted that larvae should be less abundant in the zone exposed to anthropogenic sounds. However, nearly twice as many larvae were caught in zones exposed to anthropogenic sounds than in zones with ambient sounds, which suggests a positive phototaxic response to the treatment.

There are two mechanisms that could explain this discrepancy: 1- the sound treatment was not loud or intermittent enough to trigger a negative phonotaxic response, 2- larvae use low frequency and continuous sounds to find growth habitats, and thus, are naturally attracted to such sounds. Results from marine studies suggest that the second hypothesis is likely. Indeed, studies by Jung & Swearer (2011) and Cresci *et al.* (2023) found that fish larvae displayed positive phonotaxis toward underwater harbor and wind-farm sounds, respectively. Harbour, windfarm, and the sound treatment we used are all continuous low-frequency sounds, resembling that of louder background sounds. Parmentier *et al*. (2015) also found that larvae of a few species were attracted to white-noise sounds. Fish larvae might not be able to distinguish natural reef sounds and continuous anthropogenic sounds, which could alter the choice of their settlement habitat. Therefore, the addition of continuous low-frequency sounds, usually louder than natural ambient sounds, could increase larval recruitment through acoustic enrichment effects (e.g., Gordon *et al.*, 2019). Such innate behaviour might disappear, or even reverse, at the adult stage. We hypothesize that fish larvae are more likely to show positive phonotaxis to continuous sounds, both anthropogenic and natural, which would also explain the contradictory results obtained by Simpson *et al*. (2016), where an intermittent sound treatment was used.

We tested if the phonotaxic response of fish larvae to anthropogenic sounds is modulated by their body length and auditory specializations. We predicted that the phonotaxis response would be more contrasted for larvae in the larger size intervals and equipped with auditory specializations. In all our analyses, we captured significantly more larvae of the unspecialized groups (NSB and SBO) in the treatment zone, pointing to a consistent positive phonotaxis toward the anthropogenic sounds. When considering species from the late-specialized groups (SBM and WEB), only larvae in the larger body length interval showed a positive phonotaxis. Since the

number of larvae of the late-specialized groups caught in the smallest body length intervals was low in our peak abundance trials, it was impossible to evaluate how they responded to the sound treatment. In the low abundance trials, we observed that larvae of the late-specialized groups caught in the sound treatment zone were of larger size. Altogether, our results suggest that the phonotaxic response of larvae of the late-specialized group to anthropogenic sounds depends on body length.

The joint effects of auditory specialization and body length on the positive phonotaxic response of fish larvae are supported by our literature synthesis of hearing thresholds. Consistent with their phonotaxic response, the hearing sensitivity of larvae in the unspecialized (SBO) group does not change much with body length, while it increases drastically in the late-specialized group. Another convergent result is the body length cutoff at which larvae of the late-specialized group initiates phonotaxic behaviours. The hearing thresholds of late-specialized larvae start to differ from the ones of unspecialized larvae at a body length around 20 mm. This cutoff corresponds to the largest body length interval in our peak abundance trials, in which we observed the strongest phonotaxic responses, as well as the mid-point separating larvae with late developing auditory specializations caught in the control zone (19 ± 6 mm) versus the sound treatment zone (23 ± 5 mm) in our low abundance trials. In all trials, most larvae in the late-specialized group belonged to species of the Catostomidae family (WEB group). We do not know the development rate of the auditory system of Castostomidae larvae but published growth curves for sucker species of the same family, in Oregon USA, suggest a mean age of 46 days post-hatching when reaching 20 mm in length (Wood et al., 2014). Studying other species of the WEB group, Grande & Young (2004) found that it takes between 35 and 52 days post-hatching before all the ossicles of the Weberian apparatus are fully distinguished. Accordingly, we propose that the Catostomidae larvae caught in

our experiment (i.e. mostly white sucker, *Catostomus comersonii* and longnose sucker, *Catostomus catostomus*) acquire a functional Weberian apparatus around 20 mm in length.

In summary, our results suggest that freshwater fish larvae exposed to continuous anthropogenic sounds are captured in higher abundances and t hat the strength of the phonotaxic response may depend on the development of hearing specializations. Late-specializing larvae appeared to exhibit stronger behavioural responses to anthropogenic sounds than unspecialized larvae, but only after reaching a body length of approximately 20 mm. However, because no species possessing a labyrinth organ are native to North America, the early-specializing group could not be included in the field experiment. We hypothesize that larvae in this group would exhibit a strong positive phonotactic response from early developmental stages, with little or no effect of body size on response strength. Future research could help refine and extend these conclusions. Because the effects of anthropogenic noise and the responses of fish larvae may vary among sound types, experiments using a broader range of common anthropogenic sounds would improve our understanding of the consequences of aquatic noise pollution. A particular attention should be given to distinguishing continuous anthropogenic sounds from naturally occurring continuous background noise, which may overlap in their acoustic characteristics. Experimental designs should also separate phonotactic responses to sound from positive phototaxis, especially when light conditions differ among treatments or sampling locations. In addition, measurements of both sound pressure and particle motion are needed to determine which acoustic component is detected by larvae and to distinguish pressure-mediated hearing from particle-motion detection. Finally, examining a larger number of species and a broader range of body lengths would provide a more complete understanding of how developmental stage and variation within auditory-specialization groups influence behavioural responses to anthropogenic sounds.

2.6 Conclusion

The contrasting response in behavior between adults and larvae fish has important implications for fish population management and conservation. Sound exposure criteria have so far focused on adult fish and might not be best suited to protect species across their whole life cycle. Furthermore, firmly establishing that fish larvae are attracted to some types of anthropogenic sounds may create an ecological trap. While sound exposure is known to cause stress in adult fish (e.g., Cox *et al*., 2018), positive phonotaxis to anthropogenic sounds could lead larvae into unfavourable habitats. The larval stage is the most vulnerable period in the fish life (Arevalo *et al*., 2023), especially when exposed to environmental pollution (Gordina *et al*., 2001) and when settling in unfavourable habitats could impact their growth and survival (Goud *et al*., 2025). More studies are needed to assess whether the positive phonotaxic response of larvae to continuous low-frequency sounds is a ubiquitous pattern, and whether it has the potential to affect their demographic rates.

2.7 References

Alderks, P. W., & Sisneros, J. A. (2013). Development of the Acoustically Evoked Behavioral Response in Larval Plainfin Midshipman Fish, Porichthys notatus. PLOS ONE, 8(12), e82182. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0082182

Allan, J. D., Abell, R., Hogan, Z., Revenga, C., Taylor, B. W., Welcomme, R. L., & Winemiller, K. (2005). Overfishing of Inland Waters. BioScience, 55(12), 1041-1051. https://doi.org/10.1641/0006-3568(2005)055[1041:OOIW]2.0.CO;2

Amoser, S., & Ladich, F. (2003). Diversity in noise-induced temporary hearing loss in otophysine fishes. The Journal of the Acoustical Society of America, 113(4), 2170-2179. https://doi.org/10.1121/1.1557212

Arevalo, E., Cabral, H. N., Villeneuve, B., Possémé, C., & Lepage, M. (2023). Fish larvae dynamics in temperate estuaries: A review on processes, patterns and factors that determine recruitment. Fish and Fisheries, 24(3), 466-487. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/faf.12740

Astorg, L., Giguère-Tremblay, R., Martineau, C., Cabana, G., Guillemette, F., Maire, V., Rodríguez, M. A., & Fugère, V. (2025). eDNA Metabarcoding to Monitor Fish Communities in a Large River Floodplain. Environmental DNA, 7(5), e70182. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/edn3.70182

Barbeau, J., Mazzei, R., Rodríguez, M. A., & Proulx, R. (2024). Fish responses to underwater sounds depend on auditory adaptations: An experimental test of the effect of motorboat sounds on the fish community of a large fluvial lake. Ecology and Evolution, 14(3), e10946. https://doi.org/10.1002/ece3.10946

Barletta, M., Jaureguizar, A. J., Baigun, C., Fontoura, N. F., Agostinho, A. A., Almeida-Val, V. M. F., Val, A. L., Torres, R. A., Jimenes-Segura, L. F., Giarrizzo, T., Fabré, N. N., Batista, V. S., Lasso, C., Taphorn, D. C., Costa, M. F., Chaves, P. T., Vieira, J. P., & Corrêa, M. F. M. (2010). Fish and aquatic habitat conservation in South America: a continental overview with emphasis on neotropical systems. Journal of Fish Biology, 76(9), 2118-2176. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2010.02684.x

Birindelli, J. L. O., Sousa, L. M., & Pérez, M. H. S. (2009). Morphology of the Gas Bladder in Thorny Catfishes (Siluriformes: Doradidae). Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia, 158(1), 261-296. https://doi.org/10.1635/053.158.0114

Blaxter, J. H. S., & Batty, R. S. (1985). The Development of Startle Responses in Herring Larvae. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 65(3), 737-750. https://doi.org/10.1017/S0025315400052565

Brooks, M., Kristensen, K., van Benthem, K., Magnusson, A., Berg, C., Nielsen, A., Skaug, H., Maechler, M., & Bolker, B. (2017). glmmTMB Balances Speed and Flexibility Among Packages for Zero-inflated Generalized Linear Mixed Modeling. The R Journal, 9(2), 378-400. https://doi.org/doi:10.32614/RJ-2017-066.

Caiger, P. E., Montgomery, J. C., Bruce, M., Lu, J., & Radford, C. A. (2013). A proposed mechanism for the observed ontogenetic improvement in the hearing ability of hapuka (Polyprion oxygeneios). Journal of Comparative Physiology A, 199(7), 653-661. https://doi.org/10.1007/s00359-013-0820-z

Cox, K., Brennan, L. P., Gerwing, T. G., Dudas, S. E., & Juanes, F. (2018). Sound the alarm: A meta-analysis on the effect of aquatic noise on fish behavior and physiology. Global Change Biology, 24(7), 3105-3116. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/gcb.14106

Cresci, A., Zhang, G., Durif, C. M. F., Larsen, T., Shema, S., Skiftesvik, A. B., & Browman, H. I. (2023). Atlantic cod (Gadus morhua) larvae are attracted by low-frequency noise simulating that of operating offshore wind farms. Communications Biology, 6(1), 353. https://doi.org/10.1038/s42003-023-04728-y

Dahlke, F. T., Wohlrab, S., Butzin, M., & Pörtner, H.-O. (2020). Thermal bottlenecks in the life cycle define climate vulnerability of fish. Science, 369(6499), 65-70. https://doi.org/10.1126/science.aaz3658

Doroshev, S. I. C., J. W.; Hogan, K. . (1981). Initial Swim Bladder Inflation in the Larvae of Physoclistous Fishes and Its Importance for Larval Culture. ICES RPVR, 178. https://doi.org/https://doi.org/10.17895/ices.pub.19277939.v1

Duarte, C. M., Chapuis, L., Collin, S. P., Costa, D. P., Devassy, R. P., Eguiluz, V. M., Erbe, C., Gordon, T. C., Halpern, B. S., Harding, H. R., Havlik, M. N., Meekan, M., Merchant, N. D., Miksis-Olds, J. L., Parsons, M., Predragovic, M., Radford, A. N., Radford, C. A., Simpson, S. D.,…Juanes, F. (2021). The soundscape of the Anthropocene ocean. Science, 371(6529), eaba4658. https://doi.org/10.1126/science.aba4658

Egner, S., & Mann, D. (2005). Auditory Sensitivity of Sergeant Major Damselfish Abudefduf Saxatilis from Post-Settlement Juvenile to Adult. Marine Ecology-progress Series - MAR ECOL-PROGR SER, 285, 213-222. https://doi.org/10.3354/meps285213

Fuiman, L. A., Smith, M. E., & Malley, V. N. (1999). Ontogeny of routine swimming speed and startle responses in red drum, with a comparison of responses to acoustic and visual stimuli. Journal of Fish Biology, 55(sA), 215-226. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1999.tb01057.x

García-Machado, E., Laporte, M., Normandeau, E., Hernández, C., Côté, G., Paradis, Y., Mingelbier, M., & Bernatchez, L. (2022). Fish community shifts along a strong fluvial environmental gradient revealed by eDNA metabarcoding. Environmental DNA, 4(1), 117-134. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/edn3.221

Gordina, A. D., Pavlova, E. V., Ovsyany, E. I., Wilson, J. G., Kemp, R. B., & Romanov, A. S. (2001). Long-term Changes in Sevastopol Bay (the Black Sea) with Particular Reference to the Ichthyoplankton and Zooplankton. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 52(1), 1-13. https://doi.org/https://doi.org/10.1006/ecss.2000.0662

Gordon, T. A. C., Radford, A. N., Davidson, I. K., Barnes, K., McCloskey, K., Nedelec, S. L.,

Meekan, M. G., McCormick, M. I., & Simpson, S. D. (2019). Acoustic enrichment can enhance fish community development on degraded coral reef habitat. Nature Communications, 10(1), 5414. https://doi.org/10.1038/s41467-019-13186-2

Goud, E. A., Vaijnath, A., Ayushi, P., Chhaba, B., Inwati, P., & Swami, R. (2025). Impact of Aquatic Pollution on Embryonic and Larval Development in Fish: A Comprehensive Review. Journal of Scientific Research and Reports, 31(4), 113-129. https://doi.org/10.9734/jsrr/2025/v31i42933

Grande, T., & Young, B. (2004). The ontogeny and homology of the Weberian apparatus in the zebrafish Danio rerio (Ostariophysi: Cypriniformes). Zoological Journal of the Linnean Society, 140(2), 241-254. https://doi.org/10.1111/j.1096-3642.2003.00097.x

Hamilton, P. B., Cowx, I. G., Oleksiak, M. F., Griffiths, A. M., Grahn, M., Stevens, J. R., Carvalho, G. R., Nicol, E., & Tyler, C. R. (2016). Population-level consequences for wild fish exposed to sublethal concentrations of chemicals – a critical review. Fish and Fisheries, 17(3), 545-566. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/faf.12125

Hartig, F. (2024). DHARMa: residual diagnostics for hierarchical (multi-level/mixed) regression models.

Higgs, D. M., Plachta Dt Fau - Rollo, A. K., Rollo Ak Fau - Singheiser, M., Singheiser M Fau - Hastings, M. C., Hastings Mc Fau - Popper, A. N., & Popper, A. N. (2004). Development of ultrasound detection in American shad (Alosa sapidissima). (0022-0949 (Print)).

Higgs, D. M., Rollo, A. K., Souza, M. J., & Popper, A. N. (2003). Development of form and function in peripheral auditory structures of the zebrafish (Danio rerio). The Journal of the Acoustical Society of America, 113(2), 1145-1154. https://doi.org/10.1121/1.1536185

Higgs, D. M., Souza, M. J., Wilkins, H. R., Presson, J. C., & Popper, A. N. (2002). Age- and Size-Related Changes in the Inner Ear and Hearing Ability of the Adult Zebrafish (Danio rerio). Journal of the Association for Research in Otolaryngology, 3(2), 174-184. https://doi.org/10.1007/s101620020035

Holles, S., Simpson, S. D., Radford, A. N., Berten, L., & Lecchini, D. (2013). Boat noise disrupts orientation behaviour in a coral reef fish. Marine Ecology Progress Series, 485, 295-300. https://www.int-res.com/abstracts/meps/v485/p295-300/

Holt, D. E., & Johnston, C. E. (2011). Can you hear the dinner bell? Response of cyprinid fishes to environmental acoustic cues. Animal Behaviour, 82(3), 529-534. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2011.06.004

Holt, D. E., & Johnston, C. E. (2015). Traffic noise masks acoustic signals of freshwater stream fish. Biological Conservation, 187, 27-33. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.04.004

Iwashita, A., Sakamoto, M., Kojima, T., Watanabe, Y., & Soeda, H. (1999). Growth effects on the auditory threshold of red sea bream. Nippon Suisan Gakkaishi, 65(5), 833-838. https://doi.org/10.2331/suisan.65.833

Jung, C. A., & Swearer, S. E. (2011). Reactions of temperate reef fish larvae to boat sound. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 21(4), 389-396. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/aqc.1190

Kacem, Z., Rodríguez, M. A., Roca, I. T., & Proulx, R. (2020). The riverscape meets the soundscape: acoustic cues and habitat use by brook trout in a small stream. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 77(6), 991-999. https://doi.org/10.1139/cjfas-2019-0311

Kenyon, T. N. (1996). Ontogenetic changes in the auditory sensitivity of damselfishes (pomacentridae). Journal of Comparative Physiology A, 179(4), 553-561. https://doi.org/10.1007/BF00192321

Laporte, M., Giacomazzo, M., Ragot-Peere, R., Gagnon, M.-J., Brodeur, P., Paquin, É., Bernatchez, S., Bégin, P. N., Mingelbier, M., Paradis, Y., & Pouliot, R. (2025). La transformation du lac Saint-Pierre: plus qu'une histoire de perchaude. Canadian Journal of Zoology, 103, 1-15. https://doi.org/10.1139/cjz-2024-0142

Lechner, W., Heiss, E., Schwaha, T., Glösmann, M., & Ladich, F. (2011). Ontogenetic Development of Weberian Ossicles and Hearing Abilities in the African Bullhead Catfish. PLOS ONE, 6(4), e18511. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0018511

Lechner, W., Wysocki, L. E., & Ladich, F. (2010). Ontogenetic development of auditory sensitivity and sound production in the squeaker catfish Synodontis schoutedeni. BMC Biology, 8(1), 10. https://doi.org/10.1186/1741-7007-8-10

Leis, J. M., Siebeck, U., & Dixson, D. L. (2011). How Nemo Finds Home: The Neuroecology of Dispersal and of Population Connectivity in Larvae of Marine Fishes. Integrative and Comparative Biology, 51(5), 826-843. https://doi.org/10.1093/icb/icr004

Lu, Z., & DeSmidt, A. A. (2013). Early development of hearing in zebrafish. (1438-7573 (Electronic)).

Mathon, L., Valentini, A., Guérin, P.-E., Normandeau, E., Noel, C., Lionnet, C., Boulanger, E., Thuiller, W., Bernatchez, L., Mouillot, D., Dejean, T., & Manel, S. (2021). Benchmarking bioinformatic tools for fast and accurate eDNA metabarcoding species identification. Molecular Ecology Resources, 21(7), 2565-2579. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1755-0998.13430

Merchant, N. D., Fristrup, K. M., Johnson, M. P., Tyack, P. L., Witt, M. J., Blondel, P., & Parks, S. E. (2015). Measuring acoustic habitats. Methods in Ecology and Evolution, 6(3), 257-265. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/2041-210X.12330

Mickle, M. F., & Higgs, D. M. (2017). Integrating techniques: a review of the effects of

anthropogenic noise on freshwater fish. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 75(9), 1534-1541. https://doi.org/10.1139/cjfas-2017-0245

Mingelbier, M., Chion, C., Lagrois, D., Roca, I. T., & Senecal, J.-F. (2023). Open-Air Acoustic Laboratory in a World Biosphere Reserve: The Case of Lake Saint-Pierre, Canada. In A. N. Popper, J. Sisneros, A. D. Hawkins, & F. Thomsen (Eds.), The Effects of Noise on Aquatic Life: Principles and Practical Considerations (pp. 1-18). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-10417-6_112-1

Miya, M., Sato, Y., Fukunaga, T., Sado, T., Poulsen, J. Y., Sato, K., Minamoto, T., Yamamoto, S., Yamanaka, H., Araki, H., Kondoh, M., & Iwasaki, W. (2015) MiFish, a set of universal PCR primers for metabarcoding environmental DNA from fishes: detection of more than 230 subtropical marine species. (2054-5703 (Print)).

Nedelec, S. L., Mills, S. C., Lecchini, D., Nedelec, B., Simpson, S. D., & Radford, A. N. (2016). Repeated exposure to noise increases tolerance in a coral reef fish. *Environmental Pollution*, *216*, 428-436. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.05.058

Parmentier, E., Berten, L., Rigo, P., Aubrun, F., Nedelec, S. L., Simpson, S. D., & Lecchini, D. (2015). The influence of various reef sounds on coral-fish larvae behaviour. Journal of Fish Biology, 86(5), 1507-1518. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jfb.12651

Picciulin, M., Sebastianutto, L., Codarin, A., Farina, A., & Ferrero, E. A. (2010). In situ behavioural responses to boat noise exposure of Gobius cruentatus (Gmelin, 1789; fam. Gobiidae) and Chromis chromis (Linnaeus, 1758; fam. Pomacentridae) living in a Marine Protected Area. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 386(1), 125-132. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jembe.2010.02.012

Pieniazek, R. H., Mickle, M. F., & Higgs, D. M. (2020). Comparative analysis of noise effects on wild and captive freshwater fish behaviour. Animal Behaviour, 168, 129-135. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2020.08.004

Pleizier, N., Schwieterman, G. D., Birnie-Gauvin, K., Blewett, T. A., Dressler, T. L., Hardison, E. A., Jeffries, K. M., Kraskura, K., Teffer, A. K., Van Wert, J. C., & Eliason, E. J. (2025). Conservation physiology of freshwater fishes: an illustration of pressing questions and implications for management. Conservation Physiology, 13(1), coaf057. https://doi.org/10.1093/conphys/coaf057

Popper, A. N., & Fay, R. R. (2011). Rethinking sound detection by fishes. Hearing Research, 273(1), 25-36. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heares.2009.12.023

Popper, A. N., & Hastings, M. C. (2009). The effects of anthropogenic sources of sound on fishes. Journal of Fish Biology, 75(3), 455-489. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2009.02319.x

Popper, A. N., & Hawkins, A. D. (2019). An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes. *Journal of Fish Biology*, *94*(5), 692-713. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jfb.13948

Popper, A. N., Hawkins, A. D., Fay, R. R., Mann, D. A., Bartol, S., Carlson, T. J., Coombs, S., Ellison, W. T., Gentry, R. L., Halvorsen, M. B., Løkkeborg, S., Rogers, P. H., Southall, B. L., Zeddies, D. G., & Tavolga, W. N. (2014). Classification of Fishes and Sea Turtles with Respect to Sound Exposure Risk. In A. N. Popper, A. D. Hawkins, R. R. Fay, D. A. Mann, S. Bartol, T. J. Carlson, S. Coombs, W. T. Ellison, R. L. Gentry, M. B. Halvorsen, S. Løkkeborg, P. H. Rogers, B. L. Southall, D. G. Zeddies, & W. N. Tavolga (Eds.), ASA S3/SC1.4 TR-2014 Sound Exposure Guidelines for Fishes and Sea Turtles: A Technical Report prepared by ANSI-Accredited Standards Committee S3/SC1 and registered with ANSI (pp. 15-16). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-06659-2_4

Popper, A. N., Hawkins, A. D., & Sisneros, J. A. (2022). Fish hearing "specialization" – a re-evaluation1. Hearing Research, 425, 108393. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heares.2021.108393

Government of Québec. (2025). Clé des familles de poissons d'eau douce du Québec. Radford, C. A., Stanley, J. A., Simpson, S. D., & Jeffs, A. G. (2011). Juvenile coral reef fish use sound to locate habitats. Coral Reefs, 30(2), 295-305. https://doi.org/10.1007/s00338-010-0710-6

Radford, C. A., Stanley, J. A., Simpson, S. D., & Jeffs, A. G. (2011). Juvenile coral reef fish use sound to locate habitats. *Coral Reefs*, *30*(2), 295-305. https://doi.org/10.1007/s00338-010-0710-6

Radford, C. A., Tindle, C. T., Montgomery, J. C., & Jeffs, A. G. (2011). Modelling a reef as an extended sound source increases the predicted range at which reef noise may be heard by fish larvae. Marine Ecology Progress Series, 438, 167-174. https://www.int-res.com/abstracts/meps/v438/p167-174/

Reynalte-Tataje, D. A., Ávila-Simas, S. d., Lopes, C. A., Silva, J. d. O. d., Ros, M. M. d. C. S. d., & Zaniboni-Filho, E. (2024). Guiding the path of larvae: The potential of light traps in Neotropical freshwater fish research. Environmental Advances, 16, 100516. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100516

Rijnsdorp, A. D., Peck, M. A., Engelhard, G. H., Möllmann, C., & Pinnegar, J. K. (2009). Resolving the effect of climate change on fish populations. ICES Journal of Marine Science, 66(7), 1570-1583. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsp056

Roca, I. T., Magnan, P., & Proulx, R. (2018). Use of acoustic refuges by freshwater fish: Theoretical framework and empirical data in a three-species trophic system. Freshwater Biology, 65(1), 45-54. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/fwb.13077

Rosen, D. E., Greenwood, P. H., Anderson, S., Weitzman, S. H., & American Museum-Bolivian, E. (1970). Origin of the Weberian apparatus and the relationships of the ostariophysan and gonorynchiform fishes. American Museum of Natural History. Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. Nature Methods, 9(7), 671-675. https://doi.org/10.1038/nmeth.2089

Simpson, S., Meekan, M., & Jeffs, A. (2004). Attraction of settlement-stage coral reef fishes to reef noise. Marine Ecology-progress Series - MAR ECOL-PROGR SER, 276, 263-268. https://doi.org/10.3354/meps276263

Simpson, S. D., Radford, A. N., Holles, S., Ferarri, M. C. O., Chivers, D. P., McCormick, M. I., & Meekan, M. G. (2016). Small-Boat Noise Impacts Natural Settlement Behavior of Coral Reef Fish Larvae. The Effects of Noise on Aquatic Life II, New York, NY.

Sisneros, J. A., & Bass, A. H. (2005). Ontogenetic changes in the response properties of individual, primary auditory afferents in the vocal plainfin midshipman fish Porichthys notatus Girard. Journal of Experimental Biology, 208(16), 3121-3131. https://doi.org/10.1242/jeb.01742

Slabbekoorn, H., Bouton, N., van Opzeeland, I., Coers, A., ten Cate, C., & Popper, A. N. (2010). A noisy spring: the impact of globally rising underwater sound levels on fish. Trends in Ecology & Evolution, 25(7), 419-427. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.04.005

Sueur, J., Aubin, A., & Simonis, C. (2008). Seewave: a free modular tool for sound analysis and synthesis. Bioacoustics, 18, 213-226.

Tan, Y., Hu, W., Yi, W., Tang, Z., Zhang, C., Zhu, S., Yang, G., & Cai, L. (2025). Effects of Sound Intensity and Frequency on Negative Phonotaxis in Adult Bighead Carp. Water, 17(24), 3555. te Velde, K.,

Velde, K., Mairo, A., Peeters, E. T. H. M., Winter, H. V., Tudorache, C., & Slabbekoorn, H. (2024). Natural soundscapes of lowland river habitats and the potential threat of urban noise pollution to migratory fish. Environmental Pollution, 359, 124517. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124517

R Core Team. (2024). R: A language and environment for statistical computing.

Vardakas, L. A.-O., Perdikaris, C. A.-O., Freyhof, J. A.-O., Zimmerman, B. A.-O., Ford, M. A.-O., Vlachopoulos, K. A.-O., Koutsikos, N. A.-O., Karaouzas, I. A.-O., Chamoglou, M. A.-O., & Kalogianni, E. A.-O. Global Patterns and Drivers of Freshwater Fish Extinctions: Can We Learn From Our Losses? (1365-2486 (Electronic)).

Vasconcelos, R. O., Alderks, P. W., & Sisneros, J. A. (2016). Development of Structure and Sensitivity of the Fish Inner Ear. In J. A. Sisneros (Ed.), Fish Hearing and Bioacoustics: An Anthology in Honor of Arthur N. Popper and Richard R. Fay (pp. 291-318). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-21059-9_14

Vasconcelos, R. O., & Ladich, F. (2008). Development of vocalization, auditory sensitivity and acoustic communication in the Lusitanian toadfish Halobatrachus didactylus. Journal of Experimental Biology, 211(4), 502-509. https://doi.org/10.1242/jeb.008474

Vieira, L. S., Vaz, D. F. B., & Netto-Ferreira, A. L. (2023). Ontogeny of the swim bladder of the

Plainfin Midshipman, Porichthys notatus (Percomorphacea: Batrachoidiformes). Zoology, 159, 126102. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.zool.2023.126102

Waddell, E., & Širović, A. (2023). Effects of anthropogenic noise and natural soundscape on larval fish behavior in four estuarine species. The Journal of the Acoustical Society of America, 154, 863-873. https://doi.org/10.1121/10.0020581

Webb, J. F., Walsh, R. M., Casper, B. M., Mann, D. A., Kelly, N., & Cicchino, N. (2012). Development of the ear, hearing capabilities and laterophysic connection in the spotfin butterflyfish (Chaetodon ocellatus). Environmental Biology of Fishes, 95(2), 275-290. https://doi.org/10.1007/s10641-012-9991-7

Whitfield, A. K., & Becker, A. (2014). Impacts of recreational motorboats on fishes: A review. Marine Pollution Bulletin, 83(1), 24-31. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.03.055

Wiernicki, C. J., Liang, D., Bailey, H., & Secor, D. H. (2020). The Effect of Swim Bladder Presence and Morphology on Sound Frequency Detection for Fishes. Reviews in Fisheries Science & Aquaculture, 28(4), 459-477. https://doi.org/10.1080/23308249.2020.1762536

Wood, T., Hendrixson, H., Markle, D., Erdman, C., Burdick, S., & Ellsworth, C. (2014). Simulation and validation of larval sucker dispersal and retention through the restored Williamson River Delta and Upper Klamath Lake system, Oregon Report. (Scientific Investigations Report, Issue. U. S. G. Survey. https://pubs.usgs.gov/publication/sir20135194

Wright, K., Higgs, D., Cato, D., & Leis, J. (2010). Auditory sensitivity in settlement-stage larvae of coral reef fishes. Coral Reefs, 29, 235-243. https://doi.org/10.1007/s00338-009-0572-y

Wright, K. J., Higgs, D. M., Belanger, A. J., & Leis, J. M. (2005). Auditory and olfactory abilities of pre-settlement larvae and post-settlement juveniles of a coral reef damselfish (Pisces: Pomacentridae). Marine Biology, 147(6), 1425-1434. https://doi.org/10.1007/s00227-005-0028-z

Wright, K. J., Higgs, D. M., & Leis, J. M. (2011). Ontogenetic and interspecific variation in hearing ability in marine fish larvae. Marine Ecology Progress Series, 424, 1-13. https://www.int-res.com/abstracts/meps/v424/p1-13/

Wysocki, L. E., & Ladich, F. (2001). The ontogenetic development of auditory sensitivity, vocalization and acoustic communication in the labyrinth fish Trichopsis vittata. Journal of Comparative Physiology A, 187(3), 177-187. https://doi.org/10.1007/s003590100186

Zeddies, D. G., & Fay, R. R. (2005). Development of the acoustically evoked behavioral response in zebrafish to pure tones. Journal of Experimental Biology, 208(7), 1363-1372. https://doi.org/10.1242/jeb.01534

CHAPITRE III

CONCLUSION GÉNÉRALE

3.1 Contextualisation

La pollution sonore constitue une perturbation importante pour la faune terrestre et aquatique. Historiquement, l'étude de ses effets s'est principalement concentrée sur les milieux terrestres (Slabbekoorn et Ripmeester, 2008) et, dans les milieux aquatiques, sur les mammifères marins (Duarte et al., 2021). Plus récemment, les effets de la pollution sonore sur les poissons ont suscité un intérêt croissant. Les études ont ainsi mis en évidence une grande variété de conséquences physiologiques et comportementales associées à la présence de sons anthropiques dans leurs habitats. Chez les poissons, la pollution sonore peut notamment entraîner une augmentation du stress ainsi qu'une diminution de la croissance, du succès reproducteur, de la communication, de la capacité de détection et de l'efficacité de recherche de nourriture (Cox et al., 2018; Popper et Hastings, 2009; Popper et Hawkins, 2019; Slabbekoorn et al., 2010; Whitfield et Becker, 2014). Cependant, les effets des sons anthropiques demeurent beaucoup moins étudiés dans les milieux d'eau douce que dans les milieux marins (Velde et al., 2024). Cette lacune est particulièrement préoccupante puisque, dans les milieux d'eau douce, le taux d'extinction des espèces de poissons serait 100 fois supérieur au taux naturel de référence (Vardakas et al., 2025), tandis que la fréquence de certaines perturbations, notamment la pollution sonore attribuable aux activités nautiques motorisées et récréatives, continue d'augmenter (Nautisme Québec, 2021).

Chez les poissons adultes, les sons anthropiques peuvent provoquer un comportement d'évitement, soit une phonotaxie négative (Tan et al., 2025). Barbeau et al. (2024) ont également montré que cette réponse comportementale pouvait être modulée par les capacités auditives des

espèces. Or, la grande majorité des études portant sur les effets des sons anthropiques chez les poissons se sont concentrées sur les adultes, alors que le stade larvaire demeure très peu étudié. Les larves représentent pourtant l'un des stades les plus vulnérables du cycle de vie des poissons (Arevalo et al., 2023). Leur réponse comportementale aux sons anthropiques pourrait différer de celle des adultes, notamment parce qu'elles ont été peu exposées à ces perturbations et que leur mobilité réduite limite leur capacité d'évitement.

Il est par ailleurs établi que l'audition est déjà fonctionnelle au stade larvaire et que les sons anthropiques peuvent affecter les larves de poissons. En milieu marin, celles-ci présentent notamment une phonotaxie positive envers les sons naturels produits dans les habitats côtiers (Simpson et al., 2004). Les larves pourraient donc répondre à la pollution sonore différemment des stades de vie subséquents. Il importe ainsi de mieux comprendre leurs réponses aux sons anthropiques et les mécanismes qui les distinguent de celles observées chez les poissons adultes.Chez les poissons adultes, les capacités auditives sont augmentées par la spécialisation auditive (Popper et al., 2022) et, possiblement, par la croissance en taille corporelle (Vasconcelos et Ladich, 2008). Chez les larves, on sait que la croissance en taille corporelle augmente aussi leur capacité auditive (Blaxter et Bratty, 1985; Fuiman et al., 1999; Iwashita, 1999; Lu et Desmith, 2013; Sisneros et Bass, 2005), mais l'effet des spécialisations auditives n'a toujours pas été établi. Les larves de poissons se trouvent dans une phase de développement intense et les différents niveaux de spécialisation auditive impliquent des organes très variés. Certains groupes, comme les généralistes (Doroshev et al., 1981; Vasconcelos et al., 2016) ou les spécialistes possédant un organe labyrinthe (Wysocki et Ladich, 2001), ont un système auditif complet et fonctionnel pratiquement dès la naissance, pendant que d'autres spécialisations, telles que celle possédant une modification de la vessie natatoire (Vieira et al., 2023) ou un appareil de Weber (Grande et Young,

2004), nécessitent un temps de développement beaucoup plus long avant d'avoir un système auditif complètement fonctionnel. Par conséquent, les critères utilisés pour différencier les capacités auditives entre les poissons adultes ne s'appliquent pas nécessairement aux stades larvaires.

Afin de clarifier ces aspects, le premier objectif de l'étude visait à caractériser les capacités auditives des larves de poissons en relation avec la taille corporelle et la spécialisation auditive. Le deuxième objectif était de caractériser le comportement phonotaxique des larves de poissons face aux sons anthropiques, pour ensuite, déterminer l'impact de la capacité auditive sur ce comportement en utilisant les résultats issus de l'objectif précédent.

3.2 Principaux résultats

Les résultats de l'analyse des audiogrammes recensés dans la littérature montrent que la durée de développement du système auditif influence fortement les capacités auditives des larves. La croissance corporelle avait peu d'effet sur l'audition des groupes dont le système auditif devient complet et fonctionnel tôt au cours du développement, alors qu'elle améliorait considérablement les capacités auditives des groupes à spécialisation tardive. Bien que ces derniers soient considérés comme des spécialistes de l'audition, leurs plus petites larves ne présentaient pas de capacités auditives supérieures à celles des généralistes. En revanche, comme attendu, une distinction nette entre généralistes et spécialistes apparaissait chez les larves de plus grande taille, dont le système auditif avait atteint un stade de développement plus avancé.

L'approche expérimentale visant à caractériser le comportement phonotaxique des larves face aux sons anthropiques a été réalisée dans la portion d'eau douce du fleuve Saint-Laurent, au

lac Saint-Pierre. Premièrement, les résultats indiquent que les larves de poissons démontraient une phonotaxie positive, ou une attraction, vers des sons anthropiques. Les larves généralistes ont été capturées en plus grand nombre dans les zones avec un traitement sonore, sans effet de leur taille corporelle. Concernant les spécialistes avec un temps de développement plus long de leur système auditif, une forte phonotaxie positive a été observée chez les plus grandes larves.

3.3 Discussion

L'analyse d'une compilation d'audiogrammes issus de la littérature a permis de caractériser les effets conjoints de la taille corporelle et de la spécialisation auditive sur les capacités auditives des larves de poissons. Bien que l'effet de la croissance sur l'audition larvaire soit déjà relativement bien documenté, les connaissances concernant l'influence de la spécialisation auditive reposent principalement sur des modèles établis pour les poissons adultes (Popper et al., 2022). La présente analyse se distingue donc en évaluant simultanément l'importance de la croissance corporelle, du degré de spécialisation et de la dynamique ontogénique du système auditif.

Les résultats montrent que les modèles appliqués aux poissons adultes ne permettent pas de décrire adéquatement les capacités auditives des larves. Celles-ci semblent plutôt se répartir en trois catégories distinctes, définies à la fois par leur niveau de spécialisation auditive et par le moment auquel leur système auditif devient pleinement fonctionnel. La première catégorie regroupe les généralistes, soit les taxons dépourvus de structures auditives spécialisées. Leur système auditif devient fonctionnel tôt au cours du développement, mais leurs capacités auditives demeurent généralement plus faibles et s'améliorent peu avec la croissance. La deuxième catégorie

comprend les spécialistes précoces, notamment les espèces possédant un organe labyrinthique. Chez ces espèces, le système auditif devient également fonctionnel rapidement et procure de meilleures capacités auditives que chez les généralistes, mais celles-ci varient relativement peu au cours de la croissance. Enfin, la troisième catégorie regroupe les spécialistes tardifs, dont les structures auditives spécialisées, telles que l'appareil de Weber ou les connexions dérivées de la vessie natatoire, nécessitent une période de développement plus longue. Chez les plus petits individus de ces groupes, les capacités auditives sont comparables à celles des généralistes. Elles augmentent toutefois fortement avec la croissance, de sorte que les plus grands individus présentent des capacités auditives nettement supérieures.



Figure 3.1 : Capacités auditives des larves de poissons en trois catégories. Le schéma différencie les larves de poissons en trois catégories distinctes selon leur sensibilité à la pression acoustique. Les tailles associées aux trois niveaux de spécialistes demeurent des exemples liés aux espèces capturées dans l'étude.

L'approche expérimentale a permis de décrire la réponse des larves de poissons à la présence de sons anthropiques dans leur habitat, soit leur comportement phonotaxique. À notre connaissance, seules cinq études précédentes s'y étaient intéressées (Cresci et al., 2023; Holles et al., 2013; Jung et Swearer, 2011; Simpson et al., 2016; Wadell et Sirovic, 2023), et notre recherche se démarque de ces dernières en étant la seule réalisée en milieu d'eau douce. Les résultats obtenus indiquent, contrairement aux poissons adultes, que les larves de poisson démontrent une phonotaxie positive au traitement sonore. Un comportement similaire avait déjà été trouvé dans Jung et Swearer (2011), ainsi que dans Cresci et al. (2023). Dans les trois études, le traitement sonore utilisé était composé d'un son anthropique continu, pouvant s'apparenter à un bruit blanc. Par ailleurs, Parmentier et al. (2015) avait démontré que certaines larves de poissons étaient attirées par les bruits blancs. En somme, les larves de poissons semblent démontrer une attraction envers des sons anthropiques continus, comme ceux issus d'un port. Ce comportement chez les larves de poissons pourrait être un piège écologique issu d'une phonotaxie positive vers les sons naturels côtiers, un comportement inné retrouvé chez les larves en milieu marin. Celles-ci utilisent ces types de sons pour sélectionner et localiser leur habitat de croissance, et ce, pour ensuite s'y déplacer. En d'autres mots, les larves de poissons pourraient démontrer une phonotaxie positive aux sons anthropiques continus en les confondant avec des sons naturels côtiers. Malheureusement, ce comportement pourrait être très néfaste pour les larves. Étant au stade le plus vulnérable (Arevalo et al., 2023), un déplacement des jeunes stades vers des habitats pollués et dangereux, comme les ports (Morales-Caselles et al., 2016), pourrait entraîner un ensemble de conséquences sur le recrutement des populations de poissons, tel qu'une diminution de la survie des jeunes stades (Goud et al., 2025).

L'approche expérimentale a aussi permis de caractériser l'effet des capacités auditives sur

le comportement phonotaxique. Chez les poissons adultes, on sait que de meilleures capacités auditives engendrent un comportement phonotaxique plus important (Barbeau et al., 2024). Or, aucune recherche ne s'était encore intéressée à cette relation chez les larves. À l'aide des résultats issus de la compilation d'audiogrammes, nous avons trouvé que les traits auditifs, la taille corporelle et la spécialisation auditive semblaient influencer de la même façon la capacité auditive et le comportement phonotaxique. Ainsi, nos résultats suggèrent que de meilleures capacités auditives peuvent aussi engendrer chez les larves un comportement phonotaxique plus marqué.

3.4 Prochaines étapes et limites de la recherche

Le comportement en présence de sons anthropiques observés chez les larves de poisson, étant opposé à celui attendu chez les adultes, démontre l'importance d'étudier davantage les plus jeunes stades de vie. Que ce soit au niveau de leur comportement phonotaxique ou de leur capacité auditive, les connaissances sur le stade larvaire demeurent bien moindres que celles sur le stade adulte. D'abord, malgré la pertinence des résultats obtenus, le nombre d'audiogrammes de larves de poissons est particulièrement limité dans la littérature, et ce, particulièrement pour les groupes de spécialisation ne possédant pas de vessie natatoire, possédant un organe labyrinthe ou possédant une modification de la vessie natatoire. Ainsi, il serait pertinent d'obtenir des données caractérisant la capacité auditive chez plus d'espèces. Par la suite, il serait intéressant d'approfondir les implications réelles du comportement phonotaxique des larves envers des sons anthropiques continus. Par exemple, déterminer si les habitats portuaires attirent davantage les larves que les milieux naturels serait un bon point de départ dans l'objectif d'établir des mesures de protection ou de conservation de certaines espèces. Finalement, la présente étude caractérise le comportement phonotaxique de seulement deux des trois groupes auditifs proposés pour les larves.

Malheureusement, les *Anabantoidei*, seul groupe taxonomique possédant un organe labyrinthe et seul représentant des spécialistes avec une courte période de développement, sont absents dans les écosystèmes nord-américains et n'ont donc pas pu être échantillonnés. Il serait pertinent d'aussi caractériser leur comportement phonotaxique aux sons anthropiques, ce qui permettrait de confirmer la distinction entre les trois groupes auditifs proposés pour les larves.

Les résultats et leur interprétation comportent également certaines limites. Premièrement, bien que des larves appartenant à la plupart des groupes de spécialisation auditive aient été capturées, la diversité spécifique au sein de chacun de ces groupes demeure limitée. Il subsiste donc une incertitude quant à l'origine des différences comportementales observées : celles-ci pourraient être associées aux spécialisations auditives, mais aussi refléter des réponses propres aux espèces étudiées. De même, bien que plusieurs espèces possédant un appareil de Weber aient été capturées, l'étendue des tailles corporelles représentées au sein de ce groupe demeure relativement restreinte, ce qui limite notre capacité à évaluer l'effet de la croissance sur les réponses comportementales. Deuxièmement, le traitement sonore a été conçu pour reproduire les principales caractéristiques d'un bruit anthropique continu d'origine motorisée, soit un signal inconnu des larves et susceptible de perturber leur habitat. Il diffère toutefois des sources de pollution sonore les plus courantes en milieu naturel, notamment celles associées aux embarcations motorisées récréatives. Cette différence limite donc la portée générale de nos conclusions et leur extrapolation à d'autres types de sons anthropiques. Troisièmement, l'utilisation de pièges lumineux passifs, bien qu'elle soit courante dans des études similaires menées en milieu naturel (Jung et Swearer, 2011; Simpson et al., 2016), introduit une réponse de phototaxie susceptible d'interagir avec la phonotaxie recherchée. Ainsi, même si les résultats suggèrent une réponse phonotaxique aux sons anthropiques, ils ne permettent pas de déterminer si cette réponse est attribuable uniquement au

signal acoustique ou à une interaction entre les signaux acoustique et visuel.

3.5 Conclusion

Cette étude a permis de déterminer que les larves de poissons sont attirées par des sons anthropiques continus. Cette grande différence de comportement avec les poissons adultes montre la nécessité d'étudier l'entièreté de leur cycle de vie. Néanmoins, de manière similaire aux adultes, la capacité auditive semble avoir un effet important sur le comportement phonotaxique. Plus encore, étant une période de fort développement, la différenciation des larves selon leur capacité auditive semble différer des modèles utilisés aux stades adultes. Les résultats suggèrent davantage une différenciation en trois groupes, les généralistes, les spécialistes précoces et les spécialistes tardifs. La pollution sonore est une perturbation importante dont les conséquences sont modulées par une grande variété de spécificités. On comprend donc que, dans l'objectif de prévenir l'extinction massive d'espèces de poissons en eaux douces, il importe de comprendre les différents angles de la problématique, tels que les conséquences sur les différents stades de vie ou groupes d'espèces et non de limiter notre compréhension au poisson adulte en général, comme ce qui a été fait historiquement.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Alderks, P. W., & Sisneros, J. A. (2013). Development of the Acoustically Evoked Behavioral Response in Larval Plainfin Midshipman Fish, Porichthys notatus. PLOS ONE, 8(12), e82182. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0082182

Amoser, S., & Ladich, F. (2003). Diversity in noise-induced temporary hearing loss in otophysine fishes. The Journal of the Acoustical Society of America, 113(4), 2170-2179.

Arevalo, E., Cabral, H. N., Villeneuve, B., Possémé, C., & Lepage, M. (2023). Fish larvae dynamics in temperate estuaries: A review on processes, patterns and factors that determine recruitment. Fish and Fisheries, 24(3), 466-487. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/faf.12740

Astorg, L., Giguère-Tremblay, R., Martineau, C., Cabana, G., Guillemette, F., Maire, V., Rodríguez, M. A., & Fugère, V. (2025). eDNA Metabarcoding to Monitor Fish Communities in a Large River Floodplain. Environmental DNA, 7(5), e70182.https://doi.org/https://doi.org/10.1002/edn3.70182

Barbeau, J., Mazzei, R., Rodríguez, M. A., & Proulx, R. (2024). Fish responses to underwater sounds depend on auditory adaptations: An experimental test of the effect of motorboat sounds on the fish community of a large fluvial lake. Ecology and Evolution, 14(3), e10946. https://doi.org/10.1002/ece3.10946

Bertolo, A., Blanchet, F. G., Magnan, P., Brodeur, P., Mingelbier, M., & Legendre, P. (2012). Inferring Processes from Spatial Patterns: The Role of Directional and Non–Directional Forces
in Shaping Fish Larvae Distribution in a Freshwater Lake System. PLOS ONE, 7(11), e50239. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0050239

Birindelli, J. L. O., Sousa, L. M., & Pérez, M. H. S. (2009). Morphology of the Gas Bladder in Thorny Catfishes (Siluriformes: Doradidae). Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia, 158(1), 261-296. https://doi.org/10.1635/053.158.0114

Blaxter, J. H. S., & Batty, R. S. (1985). The Development of Startle Responses in Herring Larvae. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 65(3), 737-750. https://doi.org/10.1017/S0025315400052565

Braun, C., & Grande, T. (2008). Evolution of Peripheral Mechanisms for the Enhancement of Sound Reception. In (pp. 99-144). https://doi.org/10.1007/978-0-387-73029-5_4

Caiger, P. E., Montgomery, J. C., Bruce, M., Lu, J., & Radford, C. A. (2013). A proposed mechanism for the observed ontogenetic improvement in the hearing ability of hapuka (Polyprion oxygeneios). Journal of Comparative Physiology A, 199(7), 653-661. https://doi.org/10.1007/s00359-013-0820-z

Corwin, J. T. (1983). Postembryonic growth of the macula neglecta auditory detector in the ray, Raja clavata: continual increases in hair cell number, neural convergence, and physiological sensitivity. (0021-9967 (Print)).

Cox, K., Brennan, L. P., Gerwing, T. G., Dudas, S. E., & Juanes, F. (2018). Sound the alarm: A meta-analysis on the effect of aquatic noise on fish behavior and physiology. Global Change Biology, 24(7), 3105-3116. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/gcb.14106

Cresci, A., Zhang, G., Durif, C. M. F., Larsen, T., Shema, S., Skiftesvik, A. B., & Browman, H. I. (2023). Atlantic cod (Gadus morhua) larvae are attracted by low-frequency noise simulating that of operating offshore wind farms. Communications Biology, 6(1), 353. https://doi.org/10.1038/s42003-023-04728-y

Doroshev, S. I. C., J. W.; Hogan, K. . (1981). Initial Swim Bladder Inflation in the Larvae of Physoclistous Fishes and Its Importance for Larval Culture. ICES RPVR, 178. https://doi.org/https://doi.org/10.17895/ices.pub.19277939.v1

Duarte, C. M., Chapuis, L., Collin, S. P., Costa, D. P., Devassy, R. P., Eguiluz, V. M., Erbe, C., Gordon, T. C., Halpern, B. S., Harding, H. R., Havlik, M. N., Meekan, M., Merchant, N. D., Miksis-Olds, J. L., Parsons, M., Predragovic, M., Radford, A. N., Radford, C. A., Simpson, S. D.,…Juanes, F. (2021). The soundscape of the Anthropocene ocean. Science, 371(6529), eaba4658. https://doi.org/10.1126/science.aba4658

Egner, S., & Mann, D. (2005). Auditory Sensitivity of Sergeant Major Damselfish Abudefduf Saxatilis from Post-Settlement Juvenile to Adult. Marine Ecology-progress Series - MAR ECOL-PROGR SER, 285, 213-222. https://doi.org/10.3354/meps285213

Fuiman, L. A., Smith, M. E., & Malley, V. N. (1999). Ontogeny of routine swimming speed and startle responses in red drum, with a comparison of responses to acoustic and visual stimuli. Journal of Fish Biology, 55(sA), 215-226. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1999.tb01057.x

García-Machado, E., Laporte, M., Normandeau, E., Hernández, C., Côté, G., Paradis, Y., Mingelbier, M., & Bernatchez, L. (2022). Fish community shifts along a strong fluvial environmental gradient revealed by eDNA metabarcoding. Environmental DNA, 4(1), 117-134.https://doi.org/https://doi.org/10.1002/edn3.221

Gordon, T. A. C., Radford, A. N., Davidson, I. K., Barnes, K., McCloskey, K., Nedelec, S. L., Meekan, M. G., McCormick, M. I., & Simpson, S. D. (2019). Acoustic enrichment can enhance fish community development on degraded coral reef habitat. Nature Communications, 10(1), 5414. https://doi.org/10.1038/s41467-019-13186-2

Goud, E. A., Vaijnath, A., Ayushi, P., Chhaba, B., Inwati, P., & Swami, R. (2025). Impact of Aquatic Pollution on Embryonic and Larval Development in Fish: A Comprehensive Review. Journal of Scientific Research and Reports, 31(4), 113-129. https://doi.org/10.9734/jsrr/2025/v31i42933

Grande, T., & Young, B. (2004). The ontogeny and homology of the Weberian apparatus in the zebrafish Danio rerio (Ostariophysi: Cypriniformes). Zoological Journal of the Linnean Society, 140(2), 241-254. https://doi.org/10.1111/j.1096-3642.2003.00097.x

Higgs, D. M., Plachta Dt Fau - Rollo, A. K., Rollo Ak Fau - Singheiser, M., Singheiser M Fau - Hastings, M. C., Hastings Mc Fau - Popper, A. N., & Popper, A. N. (2004). Development of ultrasound detection in American shad (Alosa sapidissima). (0022-0949 (Print)).

Higgs, D. M., Rollo, A. K., Souza, M. J., & Popper, A. N. (2003). Development of form and function in peripheral auditory structures of the zebrafish (Danio rerio). The Journal of the Acoustical Society of America, 113(2), 1145-1154. https://doi.org/10.1121/1.1536185

Higgs, D. M., Souza, M. J., Wilkins, H. R., Presson, J. C., & Popper, A. N. (2002). Age- and Size-Related Changes in the Inner Ear and Hearing Ability of the Adult Zebrafish (Danio rerio). Journal of the Association for Research in Otolaryngology, 3(2), 174-184. https://doi.org/10.1007/s101620020035

Holles, S., Simpson, S. D., Radford, A. N., Berten, L., & Lecchini, D. (2013). Boat noise disrupts orientation behaviour in a coral reef fish. Marine Ecology Progress Series, 485, 295-300. https://www.int-res.com/abstracts/meps/v485/p295-300/

Holt, D. E., & Johnston, C. E. (2011). Can you hear the dinner bell? Response of cyprinid fishes to environmental acoustic cues. Animal Behaviour, 82(3), 529-534. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2011.06.004

Holt, D. E., & Johnston, C. E. (2015). Traffic noise masks acoustic signals of freshwater stream fish. Biological Conservation, 187, 27-33. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.04.004

Hu, Y., Majoris, J., E. , Buston, P., M. , & Webb, J., F. . (2022). Ear Development in Select Coral Reef Fishes: Clues for the Role of Hearing in Larval Orientation Behavior? Ichthyology & Herpetology, 110(4), 759-775. https://doi.org/10.1643/i2022029

Iwashita, A., Sakamoto, M., Kojima, T., Watanabe, Y., & Soeda, H. (1999). Growth effects on the auditory threshold of red sea bream. Nippon Suisan Gakkaishi, 65(5), 833-838. https://doi.org/10.2331/suisan.65.833

Jalkanen, J.-P., Johansson, L., Andersson, M. H., Majamäki, E., & Sigray, P. (2022). Underwater noise emissions from ships during 2014–2020. Environmental Pollution, 311, 119766. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119766

Jung, C. A., & Swearer, S. E. (2011). Reactions of temperate reef fish larvae to boat sound. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 21(4), 389-396. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/aqc.1190

Kenyon, T. N. (1996). Ontogenetic changes in the auditory sensitivity of damselfishes (pomacentridae). Journal of Comparative Physiology A, 179(4), 553-561. https://doi.org/10.1007/BF00192321

Ladich, F., & Schulz-Mirbach, T. (2016). Diversity in Fish Auditory Systems: One of the Riddles of Sensory Biology [Review]. Frontiers in Ecology and Evolution, 4. https://www.frontiersin.org/journals/ecology-and evolution/articles/10.3389/fevo.2016.00028

Lagrois, D., Roca, I. T., Mingelbier, M., Sénécal, J.-F., & Chion, C. (2025). Assessment of sound attenuation by submerged aquatic vegetation in shallow freshwaters. *Applied Acoustics*, *240*, 110936. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2025.110936

Lechner, W., Heiss, E., Schwaha, T., Glösmann, M., & Ladich, F. (2011). Ontogenetic Development of Weberian Ossicles and Hearing Abilities in the African Bullhead Catfish. PLOS ONE, 6(4), e18511. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0018511

Lechner, W., & Ladich, F. (2008). Size matters: diversity in swimbladders and Weberian ossicles affects hearing in catfishes. Journal of Experimental Biology, 211(10), 1681-1689. https://doi.org/10.1242/jeb.016436

Lechner, W., Wysocki, L. E., & Ladich, F. (2010). Ontogenetic development of auditory sensitivity and sound production in the squeaker catfish Synodontis schoutedeni. BMC Biology, 8(1), 10. https://doi.org/10.1186/1741-7007-8-10

Leis, J., & Lockett, M. (2005). Localization of Reef Sounds by Settlement-Stage Larvae of Coral-Reef Fishes (Pomacentridae). Bulletin of Marine Science, 76, 715-724.

Leis, J. M., Siebeck, U., & Dixson, D. L. (2011). How Nemo Finds Home: The Neuroecology of Dispersal and of Population Connectivity in Larvae of Marine Fishes. Integrative and Comparative Biology, 51(5), 826-843. https://doi.org/10.1093/icb/icr004

Lu, Z., & DeSmidt, A. A. (2013). Early development of hearing in zebrafish. (1438-7573 (Electronic)).

Mathon, L., Valentini, A., Guérin, P.-E., Normandeau, E., Noel, C., Lionnet, C., Boulanger, E., Thuiller, W., Bernatchez, L., Mouillot, D., Dejean, T., & Manel, S. (2021). Benchmarking bioinformatic tools for fast and accurate eDNA metabarcoding species identification. Molecular Ecology Resources, 21(7), 2565-2579. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1755-0998.13430

McCormick, M. I., Allan, B. J. M., Harding, H., & Simpson, S. D. (2018). Boat noise impacts risk assessment in a coral reef fish but effects depend on engine type. Scientific Reports, 8(1), 3847. https://doi.org/10.1038/s41598-018-22104-3

McCune, A. R., & Carlson, R. L. (2004). Twenty ways to lose your bladder: common natural mutants in zebrafish and widespread convergence of swim bladder loss among teleost fishes. (1520-541X (Print)).

Mingelbier, M., Chion, C., Lagrois, D., Roca, I. T., & Senecal, J.-F. (2023). Open-Air Acoustic Laboratory in a World Biosphere Reserve: The Case of Lake Saint-Pierre, Canada. In A. N. Popper, J. Sisneros, A. D. Hawkins, & F. Thomsen (Eds.), The Effects of Noise on Aquatic Life: Principles and Practical Considerations (pp. 1-18). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-10417-6_112-1

Mingelbier, M., Paradis, Y., Brodeur, P., de la Chenelière, V., Lecomte, F., Hatin, D., & Verreault, G. (2016). Gestion des poissons d'eau douce et migrateurs dans le Saint-Laurent : mandats, enjeux et perspectives. Le Naturaliste canadien, 140(2), 74-90. https://doi.org/https://doi.org/10.7202/1036506ar

Miya, M., Sato, Y., Fukunaga, T., Sado, T., Poulsen, J. Y., Sato, K., Minamoto, T., Yamamoto, S., Yamanaka, H., Araki, H., Kondoh, M., & Iwasaki, W. (2015) MiFish, a set of universal PCR primers for metabarcoding environmental DNA from fishes: detection of more than 230 subtropical marine species. (2054-5703 (Print)).

Morales-Caselles, C. G., Wenhui; Ross, Peter S.; Fanning, Lucia (2016). Emerging Contaminants of Concern in Canadian Harbours: A case study of Halifax Harbour. Marine Affairs Program Technical Report, 15.

Nedelec, S. L., Mills, S. C., Lecchini, D., Nedelec, B., Simpson, S. D., & Radford, A. N. (2016). Repeated exposure to noise increases tolerance in a coral reef fish. Environmental Pollution, 216, 428-436. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.05.058

Niles, J., & Hartman, K. (2007). Comparison of Three Larval Fish Gears to Sample Shallow Water Sites on a Navigable River. North American Journal of Fisheries Management - NORTH AM J FISH MANAGE, 27, 1126-1138. https://doi.org/10.1577/M05-207.1

OSPAR. (2009). Overview of the impacts of anthropogenic underwater sound in the marine environment.

Picciulin, M., Sebastianutto, L., Codarin, A., Farina, A., & Ferrero, E. A. (2010). In situ behavioural responses to boat noise exposure of Gobius cruentatus (Gmelin, 1789; fam. Gobiidae) and Chromis chromis (Linnaeus, 1758; fam. Pomacentridae) living in a Marine Protected Area. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 386(1), 125-132. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jembe.2010.02.012

Pieniazek, R. H., Mickle, M. F., & Higgs, D. M. (2020). Comparative analysis of noise effects on wild and captive freshwater fish behaviour. Animal Behaviour, 168, 129-135. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2020.08.004

Pijanowski, B. C., Villanueva-Rivera, L. J., Dumyahn, S. L., Farina, A., Krause, B. L., Napoletano, B. M., Gage, S. H., & Pieretti, N. (2011). Soundscape Ecology: The Science of Sound in the Landscape. BioScience, 61(3), 203-216. https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.3.6

Popper, A., & Hawkins, A. (2018). The importance of particle motion to fishes and invertebrates. The Journal of the Acoustical Society of America, 143, 470-488. https://doi.org/10.1121/1.5021594

Popper, A. N., & Fay, R. R. (2011). Rethinking sound detection by fishes. Hearing Research, 273(1), 25-36. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heares.2009.12.023

Popper, A. N., & Hastings, M. C. (2009). The effects of anthropogenic sources of sound on fishes. Journal of Fish Biology, 75(3), 455-489. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2009.02319.x

Popper, A. N., & Hawkins, A. D. (2019). An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes. Journal of Fish Biology, 94(5), 692-713. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jfb.13948

Popper, A. N., Hawkins, A. D., & Sisneros, J. A. (2022). Fish hearing “specialization” – a re-evaluation1. Hearing Research, 425, 108393. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heares.2021.108393

Popper, A. N., Ramcharitar, J., & Campana, S. E. (2005). Why otoliths? Insights from inner ear physiology and fisheries biology. Marine and Freshwater Research, 56(5), 497-504. https://doi.org/10.1071/MF04267

Proulx, R., Waldinger, J., & Koper, N. (2019). Anthropogenic Landscape Changes and Their Impacts on Terrestrial and Freshwater Soundscapes. Current Landscape Ecology Reports, 4(3), 41-50. https://doi.org/10.1007/s40823-019-00038-4

Gouvernement du Québec (2024). Liste des espèces fauniques.

Gouvernement du Québec (2025). Clé des familles de poissons d'eau douce du Québec.

Nautisme Québec. (2021). Groupe d'action nautique de l'Archipel du Grand Montréal : Portrait actualisé du nautisme dans l'Archipel du Grand Montréal. https://nautismequebec.com/content/uploads/2022/01/Rapport_Groupe-Action-Nautique-Archipel-Grand-Montre%CC%81al_V4.pdf

Radford, C. A., Stanley, J. A., Simpson, S. D., & Jeffs, A. G. (2011). Juvenile coral reef fish use sound to locate habitats. Coral Reefs, 30(2), 295-305. https://doi.org/10.1007/s00338-010-0710-6

Radford, C. A., Tindle, C. T., Montgomery, J. C., & Jeffs, A. G. (2011). Modelling a reef as an extended sound source increases the predicted range at which reef noise may be heard by fish larvae. Marine Ecology Progress Series, 438, 167-174. https://www.int-res.com/abstracts/meps/v438/p167-174/

Reynalte-Tataje, D. A., Ávila-Simas, S. d., Lopes, C. A., Silva, J. d. O. d., Ros, M. M. d. C. S. d., & Zaniboni-Filho, E. (2024). Guiding the path of larvae: The potential of light traps in Neotropical freshwater fish research. Environmental Advances, 16, 100516. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100516

Rogers, P. H., & Cox, M. (1988, 1988//). Underwater Sound as a Biological Stimulus. Sensory Biology of Aquatic Animals, New York, NY.

Rosen, D. E., Greenwood, P. H., Anderson, S., Weitzman, S. H., & American Museum-Bolivian, E. (1970). Origin of the Weberian apparatus and the relationships of the ostariophysan and gonorynchiform fishes. American Museum of Natural History.

Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. Nature Methods, 9(7), 671-675. https://doi.org/10.1038/nmeth.2089

Shannon, G., McKenna, M. F., Angeloni, L. M., Crooks, K. R., Fristrup, K. M., Brown, E., Warner, K. A., Nelson, M. D., White, C., Briggs, J., McFarland, S., & Wittemyer, G. (2016). A synthesis of two decades of research documenting the effects of noise on wildlife. Biological Reviews, 91(4), 982-1005. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/brv.12207

Simpson, S., Meekan, M., & Jeffs, A. (2004). Attraction of settlement-stage coral reef fishes to reef noise. Marine Ecology-progress Series - MAR ECOL-PROGR SER, 276, 263-268. https://doi.org/10.3354/meps276263

Simpson, S. D., Radford, A. N., Holles, S., Ferarri, M. C. O., Chivers, D. P., McCormick, M. I., & Meekan, M. G. (2016, 2016//). Small-Boat Noise Impacts Natural Settlement Behavior of Coral Reef Fish Larvae. The Effects of Noise on Aquatic Life II, New York, NY.

Sisneros, J. A., & Bass, A. H. (2005). Ontogenetic changes in the response properties of individual, primary auditory afferents in the vocal plainfin midshipman fish Porichthys notatus Girard. Journal of Experimental Biology, 208(16), 3121-3131. https://doi.org/10.1242/jeb.01742

Slabbekoorn, H., Bouton, N., van Opzeeland, I., Coers, A., ten Cate, C., & Popper, A. N. (2010). A noisy spring: the impact of globally rising underwater sound levels on fish. Trends in Ecology & Evolution, 25(7), 419-427. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.04.005

Slabbekoorn, H., & Ripmeester, E. A. (2008). Birdsong and anthropogenic noise: implications and applications for conservation. (0962-1083 (Print)).

Stanley, J. A., Caiger, P. E., Phelan, B., Shelledy, K., Mooney, T. A., & Van Parijs, S. M. (2020). Ontogenetic variation in the auditory sensitivity of black sea bass (Centropristis striata) and the implications of anthropogenic sound on behavior and communication. Journal of Experimental Biology, 223(13), jeb219683. https://doi.org/10.1242/jeb.219683

Tan, Y., Hu, W., Yi, W., Tang, Z., Zhang, C., Zhu, S., Yang, G., & Cai, L. (2025). Effects of Sound Intensity and Frequency on Negative Phonotaxis in Adult Bighead Carp. Water, 17(24), 3555.

Velde, K., Mairo, A., Peeters, E. T. H. M., Winter, H. V., Tudorache, C., & Slabbekoorn, H. (2024). Natural soundscapes of lowland river habitats and the potential threat of urban noise pollution to migratory fish. Environmental Pollution, 359, 124517. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124517

Tolimieri, N., Haine, O., Jeffs, A., McCauley, R., & Montgomery, J. (2004). Directional orientation of pomacentrid larvae to ambient reef sound. Coral Reefs, 23(2), 184-191. https://doi.org/10.1007/s00338-004-0383-0

Tolimieri, N., Haine, O., Montgomery, J., & Jeffs, A. (2002). Ambient sound as a navigational cue for larval reef fish. Bioacoustics-the International Journal of Animal Sound and Its Recording - BIOACOUSTICS, 12, 214-217. https://doi.org/10.1080/09524622.2002.9753700

Tolimieri, N., Jeffs, A., & Montgomery, J. (2000). Ambient sound as a cue for navigation in reef fish larvae. Marine Ecology-progress Series - MAR ECOL-PROGR SER, 207, 219-224. https://doi.org/10.3354/meps207219

Vardakas, L. A.-O., Perdikaris, C. A.-O., Freyhof, J. A.-O., Zimmerman, B. A.-O., Ford, M. A.-O., Vlachopoulos, K. A.-O., Koutsikos, N. A.-O., Karaouzas, I. A.-O., Chamoglou, M. A.-O., & Kalogianni, E. A.-O. Global Patterns and Drivers of Freshwater Fish Extinctions: Can We Learn From Our Losses? (1365-2486 (Electronic)).

Vasconcelos, R. O., Alderks, P. W., & Sisneros, J. A. (2016). Development of Structure and Sensitivity of the Fish Inner Ear. In J. A. Sisneros (Ed.), Fish Hearing and Bioacoustics: An Anthology in Honor of Arthur N. Popper and Richard R. Fay (pp. 291-318). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-21059-9_14

Vasconcelos, R. O., & Ladich, F. (2008). Development of vocalization, auditory sensitivity and acoustic communication in the Lusitanian toadfish Halobatrachus didactylus. Journal of Experimental Biology, 211(4), 502-509. https://doi.org/10.1242/jeb.008474

Vieira, L. S., Vaz, D. F. B., & Netto-Ferreira, A. L. (2023). Ontogeny of the swim bladder of the Plainfin Midshipman, Porichthys notatus (Percomorphacea: Batrachoidiformes). Zoology, 159, 126102. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.zool.2023.126102

Waddell, E., & Širović, A. (2023). Effects of anthropogenic noise and natural soundscape on larval fish behavior in four estuarine species. The Journal of the Acoustical Society of America, 154, 863-873. https://doi.org/10.1121/10.0020581

Webb, J. F., Walsh, R. M., Casper, B. M., Mann, D. A., Kelly, N., & Cicchino, N. (2012). Development of the ear, hearing capabilities and laterophysic connection in the spotfin butterflyfish (Chaetodon ocellatus). Environmental Biology of Fishes, 95(2), 275-290. https://doi.org/10.1007/s10641-012-9991-7

Whitfield, A. K., & Becker, A. (2014). Impacts of recreational motorboats on fishes: A review. Marine Pollution Bulletin, 83(1), 24-31. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.03.055

Wiernicki, C. J., Liang, D., Bailey, H., & Secor, D. H. (2020). The Effect of Swim Bladder Presence and Morphology on Sound Frequency Detection for Fishes. Reviews in Fisheries Science & Aquaculture, 28(4), 459-477. https://doi.org/10.1080/23308249.2020.1762536

Williams, R., Wright, A. J., Ashe, E., Blight, L. K., Bruintjes, R., Canessa, R., Clark, C. W., Cullis-Suzuki, S., Dakin, D. T., Erbe, C., Hammond, P. S., Merchant, N. D., O'Hara, P. D., Purser, J., Radford, A. N., Simpson, S. D., Thomas, L., & Wale, M. A. (2015). Impacts of anthropogenic noise on marine life: Publication patterns, new discoveries, and future directions in research and management. Ocean & Coastal Management, 115, 17-24. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.05.021

Wright, K., Higgs, D., Cato, D., & Leis, J. (2010). Auditory sensitivity in settlement-stage larvae of coral reef fishes. Coral Reefs, 29, 235-243. https://doi.org/10.1007/s00338-009-0572-y

Wright, K. J., Higgs, D. M., Belanger, A. J., & Leis, J. M. (2005). Auditory and olfactory abilities of pre-settlement larvae and post-settlement juveniles of a coral reef damselfish (Pisces: Pomacentridae). Marine Biology, 147(6), 1425-1434. https://doi.org/10.1007/s00227-005-0028-z

Wright, K. J., Higgs, D. M., & Leis, J. M. (2011). Ontogenetic and interspecific variation in hearing ability in marine fish larvae. Marine Ecology Progress Series, 424, 1-13. https://www.int-res.com/abstracts/meps/v424/p1-13/

Wysocki, L. E., & Ladich, F. (2001). The ontogenetic development of auditory sensitivity, vocalization and acoustic communication in the labyrinth fish Trichopsis vittata. Journal of Comparative Physiology A, 187(3), 177-187. https://doi.org/10.1007/s003590100186

Yan, H. Y., Fine, M. L., Horn, N. S., & Colón, W. E. (2000). Variability in the role of the gasbladder in fish audition. Journal of Comparative Physiology A, 186(5), 435-445. https://doi.org/10.1007/s003590050443

Zebedin, A., & Ladich, F. (2013). Does the Hearing Sensitivity in Thorny Catfishes Depend on Swim Bladder Morphology? PLOS ONE, 8(6), e67049. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067049

Zeddies, D. G., & Fay, R. R. (2005). Development of the acoustically evoked behavioral response in zebrafish to pure tones. Journal of Experimental Biology, 208(7), 1363-1372. https://doi.org/10.1242/jeb.01534

Zhu, T., Sato, Y., Sado, T., Miya, M., & Iwasaki, W. (2023). MitoFish, MitoAnnotator, and MiFish Pipeline: Updates in 10 Years. Molecular Biology and Evolution, 40(3), msad035. https://doi.org/10.1093/molbev/msad035

ANNEXE A

ESPÈCES ET RÉFÉRENCES UTILISÉES DANS L'ANALYSE DES SEUILS AUDITIFS

Species	Specialization	References	Size (mm)				
			[5 , 15[	[15 , 25[	[25 , 35[	[35 , 45[	[45 , 55[
Danio rerio	*WEB*	Higgs & al., 2002 - 2003	X	X			
		Zeddies & Fay, 2005	X	X			
Caranx ignobilis	*SBO*	Wright & al., 2011	X	X			
Epinephalus coioides	*SBO*	Wright & al., 2011	X	X	X		
Epinephalus fuscoguttatus	*SBO*	Wright & al., 2011		X	X		
Eleutheronema tetradactulum	*SBO*	Wright & al., 2011		X			
Macquaria novemaculeata	*SBO*	Wright & al., 2011	X	X			
Trichopsis vittata	*LBO*	Wysocki & Ladich, 2001		X	X	X	
Abudefdul saxatilis	*SBO*	Egner & Mann, 2005	X	X	X	X	X
Lopjiobagrus cyclurus	*WEB*	Lechner & al., 2011	X		X	X	
Polyprion oxygeneios	*SBM*	Caiger & al., 2013	X	X			
*Pomacentrus nagasakiensis**	*SBO*	Wright & al., 2005	X	X			
Alosa sapidissima	*SBM*	Higgs & al., 2004			X		X
Synodontis schoutedeni	*WEB*	Lechner & al., 2010			X	X	X
Chaetodon ocellatus	*SBM*	Webb & al., 2012		X	X		
*Porychtys notatus**	*SBO*	Alderks & Sisneros, 2013		X	X		
Halobatrachus didactylus	*SBO*	Vasconcelos & Ladich, 2008			X		
Pomacentrus amboinensis	*SBO*	Wright & al., 2010	X				
Plectropomus leopardus	*SBO*	Wright & al., 2010		X			
Lutjanus carponotatus	*SBO*	Wright & al., 2010			X		
Gnathanodon speciosus	*SBO*	Wright & al., 2010			X		
Elagatis bipinnula	*SBO*	Wright & al., 2010		X			
*Pomacentrus partitus**	*SBO*	Kenyon, 1996	X	X	X		

Annexe A : Répertoire de données concernant l'analyse des seuils auditifs. Les espèces sont liées à leur spécialisation auditive (SBO, LBO, SBM et WEB). La notation X dans les colonnes *Size* indique la présence de données sur l'espèce dans le groupe de taille associé. Pour toutes les espèces, des données étaient disponibles dans les quatre fréquences analysées, à l'exception des espèces notées par le symbole *. Aucune donnée n'était disponible à 800 Hz pour les espèces *Porychtys notatus* et *Pomacentrus partitus*, ainsi qu'à 100 Hz et 200 Hz pour l'espèce *Pomacentrus nagasakiens.*

ANNEXE B

RÉSULTATS STATISTIQUES DE L'ANALYSE DES SEUILS AUDITIFS

		Body length			Specialisation			Interaction		
		df	χ^2	*p*	*df*	χ^2	*p*	*df*	χ^2	*p*
Frequencies	100Hz	1	88.56	< 0.001	3	155.71	< 0.001	3	10.89	0.012
	200Hz	1	25.91	< 0.001	3	229.88	< 0.001	3	9.69	0.021
	400Hz	1	11.84	< 0.001	3	198.67	< 0.001	3	11.64	0.009
	800Hz	1	65.57	< 0.001	3	44.25	< 0.001	3	13.73	0.003

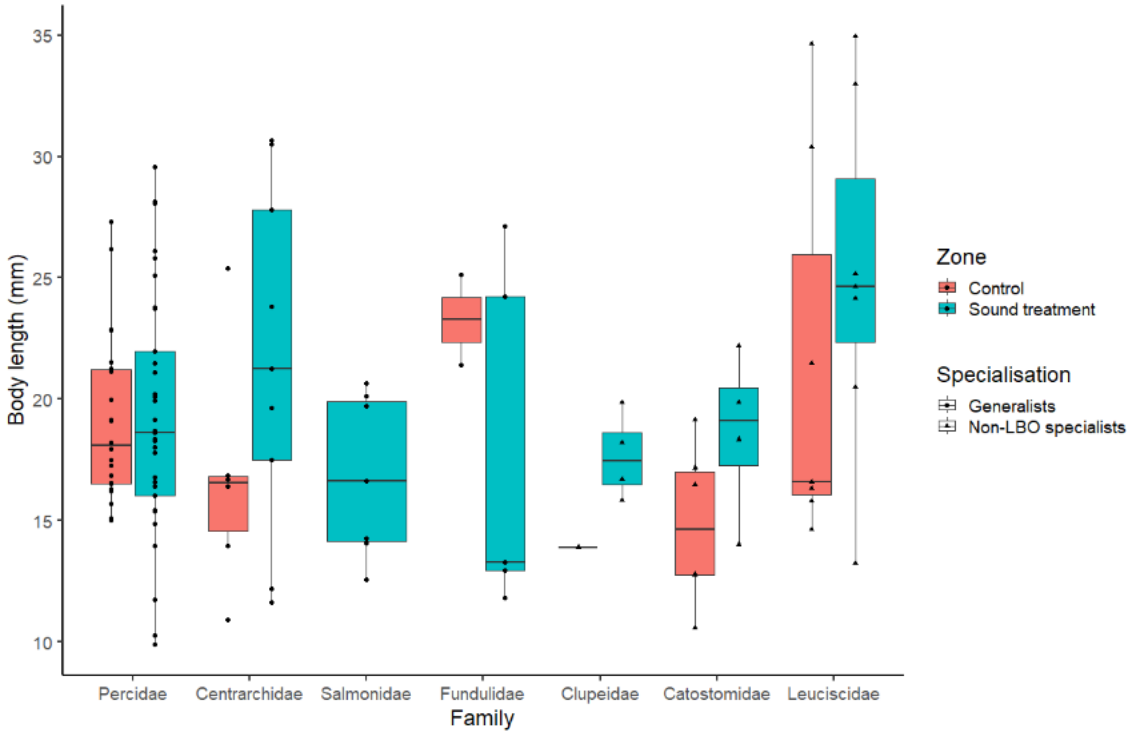
Annexe B.1 : Sorties statistiques de l'analyse des seuils auditifs. Le tableau présente les résultats statistiques des tests chicarré de Wald sur différents modèles linéaires mixtes (LMM). Un total de quatre LMMs ont été créés, un pour chacune des fréquences analysées, soit 100 Hz, 200 Hz, 400 Hz et 800 Hz.

		100Hz	200Hz	400 Hz	800 Hz
		value ± SE	value ± SE	value ± SE	value ± SE
SB only	Slope (dB/mm)	-0.09 ± 0.21	-0.06 ± 0.25	-0.37 ± 0.27	-0.24 ± 0.14
	Threshold at 10mm (dB)	122.1 ± 3.3	127.3 ± 3.9	137.0 ± 4.2	137.0 ± 3.4
SB modification	Slope (dB/mm)	-0.98 ± 0.54	-0.88 ± 0.55	-0.87 ± 0.46	-0.84 ± 0.42
	Threshold at 10mm (dB)	123.0 ± 11.2	122.6 ± 11.4	131.0 ± 9.6	125.0 ± 9.3
Weberian	Slope (dB/mm)	-1.17 ± 0.30	-1.35 ± 0.38	-1.52 ± 0.41	-1.64 ± 0.39
	Threshold at 10mm (dB)	128.3 ± 7.0	129.2 ± 8.8	128.0 ± 9.4	129.0 ± 9.1
Labyrinth organ	Slope (dB/mm)	-0.30 ± 0.03	-0.30 ± 0.07	-0.20 ± 0.10	-0.30 ± 0.04
	Threshold at 10mm (dB)	99.7 ± 0.7	92.7 ± 1.4	95.0 ± 2.2	109.0 ± 5.3

Annexe B.2 : Caractérisation des droites de l'analyse des seuils auditifs. Le tableau caractérise les droites présentées par la Figure 2.2. Cette dernière rassemble quatre figures, l'une pour chacune des fréquences (100 Hz, 200 Hz, 400 Hz et 800 Hz), qui, elles, présentent chacune quatre droites représentant les quatre groupes de spécialisations auditives : Vesse natatoire seulement (SB only), modification de la vessie natatoire (SB modification), appareil de Weber (Weberian) et organe labyrinthe (Labyrinth organ). Pour chacune de ces 16 droites, la pente et le seuil auditif à une taille de 10 mm sont présentés

ANNEXE C

FAMILLE ET TAILLE DES LARVES DANS LES SORTIES À FAIBLE ABONDANCE



Annexe C : Description des captures dans les sorties à faible abondance. À l'issue des sorties à faible abondance, 7 familles de larves ont été capturées. Pour chacune de ses familles, les distributions de taille des larves dans les deux zones expérimentales, contrôle en rouge et traitement en vert, sont présentées. Les 7 familles sont aussi caractérisées comme étant généralistes de l'audition (cercle) ou spécialistes tardifs (triangle).