

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

ÉVITEMENT DU SON ANTHROPIQUE PAR LES POISSONS D'EAU DOUCE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA
MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR
JÉRÔME BARBEAU

MARS 2023

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.

« *Fish on!* »

Cyril Chauquet

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier particulièrement mon directeur de maîtrise Raphaël Proulx pour sa disponibilité et la facilité de pouvoir travailler avec lui. Également, un merci à mon codirecteur Marco A. Rodríguez pour son ouverture et son aide judicieuse tout au long du projet. Ils forment à eux deux un duo de choix afin de superviser un étudiant dans l'aboutissement d'un projet de maîtrise.

Une attention est à porter aux membres de mon comité d'orientation constitué de Pierre Magnan et Clément Chion afin d'amener un point de vue externe et des considérations nouvelles au projet.

Je tiens à remercier mes collègues de la Chaire de recherche du Canada en intégrité écologique (CRIE) et le Centre de Recherche sur les interactions Bassins Versants – Écosystèmes Aquatiques (RIVE) pour leur soutien et de m'avoir permis de développer le côté scientifique en moi. Un merci à tous mes amis du département des sciences de l'environnement, car ce travail n'aurait jamais eu lieu sans l'aide reçue dans le cadre des campagnes sur le terrain.

En terminant, ce projet a évidemment été rendu possible grâce au financement reçu de la CRIE et du regroupement stratégique du Groupe de recherche interuniversitaire en limnologie (GRIL) pour projets conjoints réguliers.

.

AVANT-PROPOS

Le projet de maîtrise décrit dans ce mémoire a été réalisé dans le cadre du programme de maîtrise en sciences de l'environnement à l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR). La direction et la codirection ont été menées par les professeurs Raphaël Proulx et Marco A. Rodríguez. Ce document contient une synthèse des travaux menés de 2019 à 2022. En premier lieu, l'objectif était d'établir un portrait du paysage acoustique subaquatique d'eau douce afin de révéler de possibles impacts pour les poissons. Après avoir soulevé que le son anthropique puisse engendrer des implications comportementales pour le poisson, l'objectif était de tester une réponse d'évitement au son anthropique par différentes espèces de poissons dans un environnement naturel. L'approche expérimentale était d'enrichir le milieu sonore avec le bruit d'un moteur sur une embarcation et de tester l'évitement du poisson via un dénombrement des individus par espèce et par période de pêche dans des filets-trappes.

Ce mémoire comporte trois chapitres : Chapitre I) une introduction générale issue d'une revue de littérature réalisée dans le cadre de mon séminaire I, Chapitre II) une structure d'article scientifique rédigé en français et Chapitre III) une conclusion générale.

RÉSUMÉ

L'écologie des paysages acoustiques est un axe de recherche en effervescence étudiant l'assemblage des sons et leur influence sur le comportement des espèces. La part des sons induits par les activités humaines est aujourd'hui omniprésente et considérée comme une pollution sonore. L'environnement subaquatique n'est pas exempt de ce phénomène, alors que l'utilisation du territoire s'intensifie. À cet égard, les poissons ont développé une vaste gamme d'adaptations auditives au fil de leur évolution. La majorité des expériences d'enrichissement sonore en laboratoire suggèrent que les sons anthropiques n'induisent pas systématiquement un changement comportemental chez les poissons d'eau douce. Le présent projet vise donc à étudier la réaction d'une communauté de poissons en réponse aux sons anthropiques subaquatiques en milieu naturel. D'une part, l'acuité auditive des poissons d'eau douce a été recensée en lien avec leurs adaptations acoustiques. D'autre part, un portrait du paysage subaquatique d'eau douce a été établi via des enregistrements sonores qui représentent une diversité d'évènements acoustiques anthropogéniques et de sons ambiants. Par la suite, une expérience de type BACI (Before-After-Control-Impact) a été réalisée afin d'évaluer si le bruit d'un moteur engendre un évitement des poissons dans un lac fluvial. Nous avons comparé l'abondance des captures par espèce par filet-trappe entre des sites de référence et des sites soumis à un enrichissement sonore. Nos résultats montrent que la présence de spécialisations acoustiques chez les poissons abaisse le seuil auditif et augmente la fréquence sensible d'audition. Les sons anthropiques dans l'environnement augmentent le niveau sonore ambiant et dominant dans les fréquences sensibles d'audition des poissons. Ultimement, les sons de moteur entraînent un évitement chez les espèces de poissons qui possèdent des adaptations acoustiques qui augmentent leur acuité auditive.

Mots-clés : Paysage sonore, bruits anthropiques, eau douce, évitement, adaptations auditives, poissons

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
AVANT-PROPOS	iv
RÉSUMÉ	v
LISTE DES FIGURES	ix
CHAPITRE I	
INTRODUCTION	1
1.1 Problématique	1
1.2 Le son et ses composantes.....	3
1.3 Dynamique du son dans l'eau	5
1.4 Surveillance acoustique passive.....	5
1.5 Paysage acoustique subaquatique	6
1.5.1 Sons ambiants naturels	6
1.5.2 Sons anthropiques	7
1.6 Détection du bruit par les poissons	8
1.6.1 Capacité auditive.....	8
1.6.2 Importance du son pour le poisson.....	12
1.6.3 Variabilité intra- et interspécifique de la sensibilité auditive.....	13
1.7 Réponses comportementales des poissons au son.....	15
1.8 Approches expérimentales	17
1.8.1 Approche directe	17
1.8.2 Expériences de réécoute	18
1.8.3 Expériences en laboratoire	18
1.9 Objectifs et prédictions	19
CHAPITRE II	
ÉVITEMENT DU SON ANTHROPIQUE PAR LES POISSONS D'EAU DOUCE.....	20
2.1 Résumé.....	20
2.2 Introduction.....	21

2.3	Matériel et méthodes.....	23
2.3.1	Synthèse de l'acuité auditive des poissons.....	23
2.3.2	Portrait sonore du paysage subaquatique	23
2.3.3	Expérience d'enrichissement sonore.....	25
2.3.3.1	Site d'étude.....	25
2.3.3.2	Plan d'expérience	26
2.3.3.3	Analyses statistiques	27
2.4	Résultats	29
2.4.1	Synthèse de l'acuité auditive des poissons.....	29
2.4.2	Portrait sonore du paysage subaquatique	32
2.4.3	Expérience d'enrichissement sonore.....	33
2.5	Discussion	36
2.5.1	Synthèse de l'acuité auditive et portrait sonore du paysage subaquatique	36
2.5.2	Expérience d'enrichissement sonore.....	38
2.6	Conclusion	41
2.7	Références.....	42
CHAPITRE III		
CONCLUSION GÉNÉRALE.....		50
3.1	Contextualisation	50
3.2	Principaux résultats.....	51
3.3	Conclusion	52
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		55
ANNEXE A		
LISTE DES ÉVÉNEMENTS ACOUSTIQUES ANTHROPIQUES ENREGISTRÉS		
(N = 98)		63
ANNEXE B		
LISTE DES ÉVÉNEMENTS ACOUSTIQUES AMBIANTS ENREGISTRÉS		
(N = 41)		67
ANNEXE C		
ÉTENDUE DES SPECTROGRAMMES DES ÉVÉNEMENTS ACOUSTIQUES		
A) AMBIANTS (N = 41) ET B) ANTHROPIQUES (N = 98) ENREGISTRÉS		69

ANNEXE D ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES FONCTIONNELLE (FPCA) DES ENREGISTREMENTS SONORES DES DEUX DIFFÉRENTS TRAITEMENTS LORS DE L'EXPÉRIENCE D'ÉVITEMENT CONDUITE EN 2020 AU LAC SAINT-PIERRE, QUÉBEC, CANADA (AMBIENT : N = 25, MOTOR : N = 25).....	70
ANNEXE E VARIABILITÉ INTRASPÉCIFIQUE DES SEUILS AUDITIFS DE CINQ ESPÈCES DE POISSONS.....	71
ANNEXE F DISTRIBUTION DES LONGUEURS MOYENNES DES POISSONS CAPTURÉS LORS DE L'EXPÉRIENCE D'ÉVITEMENT CONDUITE EN 2020 AU LAC SAINT-PIERRE, QUÉBEC, CANADA, TOUTES ESPÈCES CONFONDUES..	72

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
1.1	Représentation d'une onde sonore avec la pression qu'elle entraîne sur le médium. (Tirée de http://www.lafontaudio.com/criteres.htm).....	4
1.2	Représentation du système auditif des otophysiens. (Tirée de https://speechlab.eece.mu.edu/dolittle/treeoflife/fish.htm)	9
1.3	Oreille interne de l'antimora bleu (<i>Antimora rostrata</i>), un poisson téléostéen. (Tirée de Popper et Hawkins, 2018.).....	10
1.4	Seuils d'audition de cinq espèces de poissons; <i>Carassius auratus</i> en noir, <i>Salmo salar</i> en rouge, <i>Euthynnus sp.</i> en vert, <i>Gadus morhua</i> en jaune et <i>Melanogrammus aeglefinus</i> en bleu. (Tirée de Popper et Hasting, 2009.)	11
1.5	Sommaire dérivé de la médiane de l'audiogramme obtenu par la méthode comportementale (rouge) et de la réponse électrophysiologique pour le poisson rouge (<i>Carassius auratus</i>). (Tirée de Ladich et Fay, 2013.)	12
1.6	Cinq grands groupes d'adaptation auditive des poissons. Aucune adaptation : absence d'une vessie natatoire. Sans connexion : présence d'une vessie natatoire sans autre adaptation. Bulle d'air : présence d'une cavité d'air près de l'oreille interne. Extension de la vessie natatoire : présence d'une extension de la vessie natatoire jusqu'à l'oreille interne. Connexion : présence d'une connexion entre la vessie natatoire et l'oreille interne via une chaîne d'osselets. (Modifiée de Ladich et Schulz et Mirbach, 2016.)	14
1.7	Relation entre la sensibilité auditive et les structures auditives des poissons de trois espèces de la famille des cichlidés; <i>Etroplus maculatus</i> , <i>Steatocranus tinanti</i> et <i>Hemichromis guttatus</i> . (Tirée de Ladich, 2014 et modifiée de Schulz et Mirbach, 2013.)	15
2.1	Répartition spatiale des engins de pêche utilisés dans les expériences d'enrichissement sonore au lac Saint-Pierre (Québec, Canada) à l'été 2020. Chaque couleur correspond à un site de pêche.....	25
2.2	Représentation d'un site de pêche.....	27
2.3	Relations phylogénétiques des 30 espèces de poissons de l'étude.....	29

2.4	Seuils auditifs (angl. : <i>hearing threshold</i>) et fréquences sensibles (angl. : <i>sensitive frequency</i>) de 185 poissons (Tirée de Ladich et Fay, 2013, Mann et al., 2007 et Nedwell et al., 2004), dont 156 espèces différentes, en fonction de leur milieu de vie et selon 5 groupes d'adaptation auditive (Section 2.3 Matériel et méthodes)	31
2.5	Diagrammes à moustaches de l'acuité auditive (angl. : <i>hearing acuity</i>) des poissons d'eau douce, de sources sonores et des traitements de l'expérience d'évitement : le niveau de pression acoustique (Max of SPL) minimal détectable (a) et de la fréquence sensible (angl. : <i>sensitive frequency</i>) des seuils auditifs de poisson d'eau douce (d), de la pression acoustique maximale (b) et de la fréquence dominante (angl. : <i>dominant frequency</i>) (e) en fonction des sources de sons relevées dans les enregistrements du paysage acoustique subaquatique de 2019-2020, de la pression acoustique maximale (c) et de la fréquence dominante (f) dans les traitements sonores de l'expérience d'évitement. Les seuils auditifs sont tirés de Nedwell et al. (2004) et Ladich et Fay (2013)	33
2.6	Synthèse de la distribution a posteriori du coefficient de régression (angl. : <i>slope coefficient</i>) associée à la réponse au bruit du traitement expérimental pour les 30 espèces étudiées (moyennes et intervalles de crédibilité à 95 %)	35
2.7	Synthèse de la distribution a posteriori du coefficient de régression associé à l'effet de l'adaptation auditive sur la réponse au bruit (angl. : <i>effect of trait on response to sound</i>) du traitement expérimental (moyenne et intervalle de crédibilité à 95 %). La distribution a priori (angl. : <i>prior</i>) est également représentée (en gris)	36

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1 Problématique

L'ensemble des sons de l'environnement provient d'organismes vivants (biotiques), de l'habitat (géophysiques) et des activités humaines (anthropiques). Cette mosaïque sonore est définie comme étant le paysage acoustique (Pijanowski et al., 2011). L'écologie des paysages acoustiques est un axe de recherche en effervescence. Cette branche de l'écologie étudie l'influence du son sur le comportement des espèces vertébrées et invertébrées (Jenni et al., 2012; Morley et al., 2013; Hawkins, 2015; Shannon et al., 2015). L'utilisation du territoire par l'humain a modifié le paysage acoustique en y ajoutant des sources sonores additionnelles et en modifiant la transmission des sons.

Plusieurs études se sont intéressées à l'impact acoustique de la navigation sur les mammifères marins (Simmonds et al., 2014; Roy et Simard, 2015; Lesage et al., 1999; Chion et al., 2017). Beaucoup moins d'études se sont intéressées à ces mêmes impacts sur les poissons (Popper et Hastings, 2009). Pourtant, le son est probablement un facteur important pour le poisson, sans quoi son système auditif ne serait pas aussi bien développé (Ladich, 2014; Ladich et Fay, 2013; Ladich et Schulz-Mirbach, 2016). Par ailleurs, la production de signaux acoustiques chez les poissons est un phénomène possiblement plus répandu qu'on le soupçonnait (Ladich, 2014; Parmentier et Fine, 2016).

Dans une synthèse récente de la littérature, Cox et al. (2018) ont examiné 3343 études publiées entre 1950 et 2015 comportant des mots-clés reliés à l'influence du son et aux poissons. De ce nombre, 452 publications ont été évaluées plus attentivement. Finalement, 42 études de 11 pays différents ont été incluses dans leur synthèse, dont 6 seulement ont été réalisées en milieu semi-naturel (par oppositions à celles en laboratoire). Les résultats montrent que les sons d'origine anthropique n'auraient pas systématiquement d'effet négatif sur le comportement ou

la physiologie du poisson (Cox et al., 2018). Selon ces auteurs, un effet négatif faisait référence à une réponse comportementale ou physiologique qui pourrait affecter la survie de l'organisme. Une autre étude synthèse a catalogué les réponses comportementales et physiologiques des poissons exposés à la pollution sonore dans des écosystèmes d'eau douce. Les auteurs concluent que les sons d'origine anthropique n'induisaient pas systématiquement un comportement d'évitement chez les poissons, mais que les évidences sont encore fragmentaires (Mickle et Higgs, 2017).

Un des comportements anticipés chez les poissons face à un facteur de stress est l'évitement. Ce comportement modifie la répartition spatiale des poissons. Des expériences menées chez des poissons captifs (Pearson et al., 1992; Fewtrell et McCauley, 2012; Neo et al., 2015; Murchy et al., 2017) et des poissons libres de mouvement en milieu marin (Vabø et al., 2002; Handegard et al., 2003; Picciulin et al., 2010; Wheeland et Rose, 2014; Brehmer et al., 2019) suggèrent que l'évitement n'est pas systématique, et probablement relié à l'affiliation phylogénétique (p. ex., présence de l'organe de Weber) et aux traits fonctionnels des poissons (p. ex., taille de la vessie natatoire).

Une centaine d'espèces de poissons dulcicoles, dont plusieurs en situation précaire (Mingelbier et al., 2016), doit composer avec le trafic maritime sur les grands et petits plans d'eau, comme le fleuve Saint-Laurent ou des lacs exploités par la pêche. La compréhension des réponses comportementales des poissons face à la pollution sonore s'avère un élément important en conservation et gestion des écosystèmes (Slabbekoorn et al., 2010; Whitfield et Becker, 2014).

Les écosystèmes d'eau douce sont soumis à une pression sonore grandissante. Les bateaux de plaisanciers et de pêcheurs sont des sources répandues de sons dans l'environnement (Whitfield et Becker, 2014). Différentes voies de navigation vers l'intérieur du continent, comme le fleuve Saint-Laurent, permettent les échanges commerciaux grâce aux navires marchands. La route fluviale du Saint-Laurent relie la région des Grands Lacs avec l'océan Atlantique. Près de 4 000 navires marchands empruntent la voie maritime du Saint-Laurent chaque année (Côté et Morin, 2007) et transitent sur les 20 ports d'importance, engendrant plus

de 10 889 mouvements de navires sur une base annuelle (Statistique Canada, 2011). La part du son attribué aux navires marchands est susceptible d'augmenter le niveau de pollution sonore dans les écosystèmes d'eau douce. À cette activité de transport maritime s'ajoutent les nombreux autres engins motorisés utilisés pour la pêche (sportive et commerciale) et les activités récréatives de promenade.

Moins d'attention a été accordée à l'impact des sons anthropiques en milieu aquatique d'eau douce comparativement aux efforts déployés en milieu terrestre (Shannon et al., 2015; Proulx et al., 2019). On suppose parfois que le monde aquatique est silencieux, et pourtant, les organismes présents doivent composer avec une mosaïque sonore hétérogène. Cette supposition est alimentée par le fait que la transmission du son de l'air à l'eau est faible, que l'oreille humaine est moins efficace sous l'eau et que l'émission de sons chez les organismes aquatiques est encore relativement peu connue (Slabbekoorn et al., 2010). Sans une compréhension fondamentale de la structure des sons dans les écosystèmes d'eau douce et la proportion des stimuli auditifs que peuvent percevoir les poissons, les résultats tirés du domaine de l'écologie acoustique ne peuvent pas produire de généralités ou de tendances fortes (Truax et Barrett, 2011).

1.2 Le son et ses composantes

Le son est une vibration physique qui s'exprime sous forme d'onde sonore (Roger et Cox, 1988). Celle-ci peut être étudiée selon deux dimensions. La première est en lien avec le mouvement des particules (Amoser et Ladich, 2005; Slabbekoorn et al., 2010). Ce mouvement s'opère lorsque les molécules oscillent autour d'un axe lors du passage d'une onde sonore. L'oscillation se transmet d'une molécule à sa voisine, mais s'atténue rapidement avec la distance jusqu'à retourner à un état d'équilibre (Slabbekoorn et al., 2010; Lugli et Fine, 2007; Bradbury et Vehrencamp, 2011; Popper et Hawkins, 2018). La deuxième dimension du son est la pression acoustique (Slabbekoorn et al., 2010). Le son entraîne une variation de pression dans le médium créant ainsi des zones de compression (forte pression) en alternance avec des zones de raréfaction (faible pression) (Bradbury et Vehrencamp, 2011; Popper et Hawkins, 2018;

OSPAR, 2009) (Figure 1.1). Cette dernière composante est perceptible sur de plus grandes distances (jusqu'à plusieurs kilomètres).

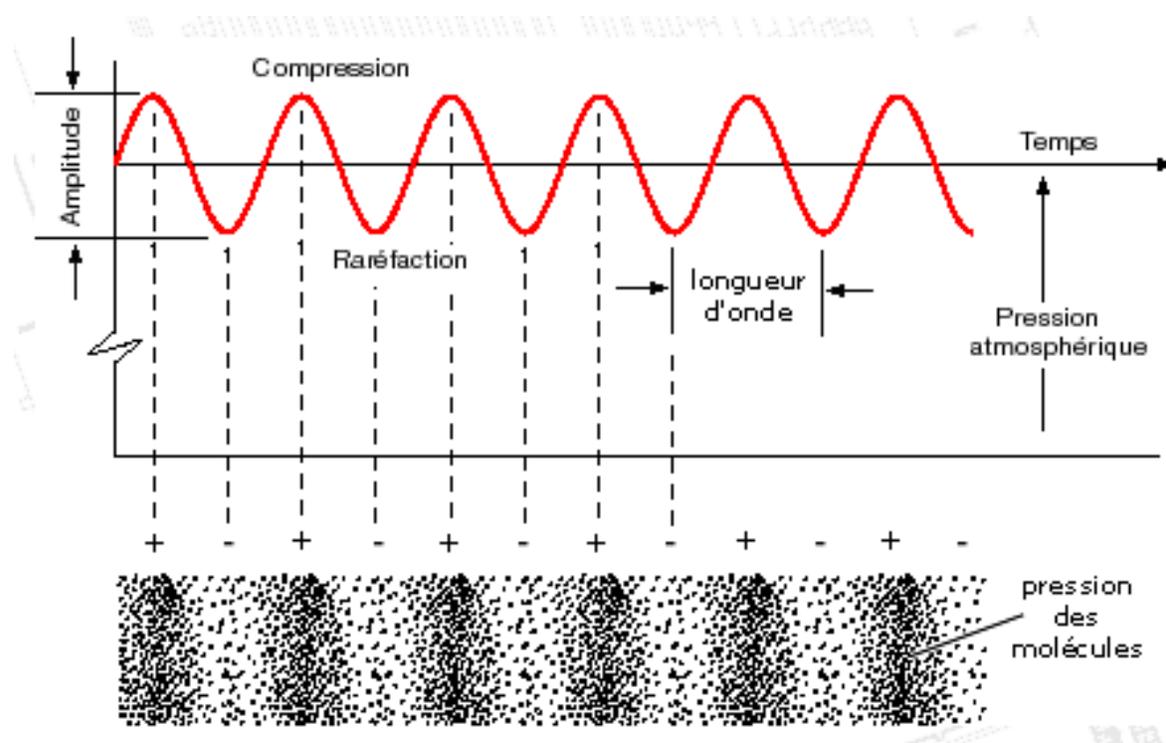


Figure 1.1 Représentation d'une onde sonore avec la pression qu'elle entraîne sur le médium. (Tirée de <http://www.lafontaudio.com/criteres.htm>)

L'intensité du son est exprimée en décibels (dB), une unité relative liée à une condition spécifique, comme le type de médium dans lequel le son se propage. Par exemple, la référence dans l'eau est de 1 micropascal (μPa), tandis que dans l'air elle est de $20 \mu\text{Pa}$ (OSPAR, 2009). Par conséquent, l'intensité d'un son est inférieure dans l'eau pour une même valeur de décibel. Par ailleurs, l'atténuation du son est moindre pour une même distance dans l'eau par rapport à l'air (Popper et Hawkins, 2019). L'onde sonore se propage donc beaucoup plus loin dans l'eau, ce qui peut affecter la faune aquatique différemment de la faune terrestre. De plus, les hautes fréquences s'atténuent davantage rapidement que les basses fréquences en s'éloignant de la source. La fréquence d'une onde sonore correspond au nombre d'oscillations par unité de temps (secondes) et s'exprime généralement en hertz (Hz).

1.3 Dynamique du son dans l'eau

Plusieurs facteurs peuvent modifier la propagation d'une onde sonore dans l'eau. La distance que va parcourir le son dépend de la profondeur d'eau et du type de substrat (Schellart et Popper, 1992). En effet, le son interagit avec les interfaces eau-air et eau-substrat (Kuperman et Ingenito, 1998). L'interface air-eau en particulier forme une barrière à la transmission du son, alors que moins de 1 % de l'intensité sonore se propagerait de part et d'autre de la surface (Leighton, 2011). Ce pourcentage pourrait être plus élevé si la surface de l'eau n'était pas considérée lisse (Godin, 2008). De plus, les longues ondes sonores sont filtrées à de faibles profondeurs d'eau. En effet, la propagation du son en eau peu profonde est limitée par la fréquence de coupure (Rogers et Cox, 1988; Akamatsu et al., 2002). Pour un substrat rigide, la fréquence de coupure (f_c ; Hz) peut être estimée par l'équation suivante : $f_c = 375/h$, ou h est la profondeur d'eau en mètres. Ainsi, on observe une atténuation très rapide du signal sonore pour les fréquences inférieures à f_c . Un autre facteur important susceptible d'avoir un impact sur l'atténuation du son en eau douce est la présence de végétation submergée. Cependant, le rôle des herbiers aquatiques d'eau douce dans l'atténuation du son demeure méconnu. Autrement, le facteur principal affectant la propagation du son est la température. En effet, la vitesse de propagation de l'onde à 2 °C est de 1399 m/s en eau douce et augmente de quelques m/s pour chaque degré Celsius additionnel (Liu et al., 2002; OSPAR, 2009). La propagation du son en lacs et rivières s'avère ainsi difficile à modéliser, car ces facteurs en affectent la dynamique.

1.4 Surveillance acoustique passive

Il est possible d'étudier les paysages acoustiques subaquatiques en effectuant des enregistrements sonores dans les écosystèmes. Cette surveillance acoustique passive (angl. : *Passive acoustic monitoring*; PAM) permet de quantifier le niveau de son et de décrire les sources sonores dans l'environnement terrestre et aquatique à une échelle spatiale ou temporelle. Le son est enregistré via un transducteur électroacoustique (hydrophone). Celui-ci détecte et convertit le son en signaux électriques. L'hydrophone peut être monté directement sur une unité de stockage ou relié à l'aide d'un câble qui conduit l'information numérique.

Ces dispositifs peuvent être portatifs, déployés sur des plateformes flottantes ou submergés. Le tout dépend inévitablement des contraintes du projet : monétaires, technologiques ou dues par les limitations du milieu (p. ex., profondeur, passage de navires, vitesse du courant, etc.). Néanmoins, il s'avère essentiel de standardiser l'échantillonnage et l'analyse afin d'interpréter les données acoustiques. À ce sujet, Merchant et al. (2015) ont développé un guide des méthodes de mesure des habitats acoustiques et de traitement des valeurs sonores perçues afin de favoriser une intégration des connaissances tirées de cette science.

1.5 Paysage acoustique subaquatique

1.5.1 Sons ambiants naturels

On décrit le son ambiant comme étant le fond sonore de base (angl. : *background*) « background », tandis que la somme des sources biotiques et géophysiques compose le son naturel. Les sources sonores naturelles d'un habitat subaquatique proviennent principalement du brassage de l'eau par les vagues et les précipitations (Amoser et Ladich, 2010; Slabbekoorn et al., 2010). La plage de fréquence du spectre sonore d'un milieu naturel (sans activités anthropiques) chevauche les fréquences audibles par les poissons. En effet, le son engendré près de l'interface air-eau est dominé par le brassage de l'eau sous l'action du vent à des fréquences variant de 1 Hz à 100 kHz (NRC, 2004). Le vent engendrerait une augmentation de l'intensité sonore de 15-20 dB re 1 μ Pa par rapport à des valeurs de base (Wenz, 1962). Quant à la pluie, les valeurs de son subaquatique peuvent augmenter de 50 dB re 1 μ Pa lors de fortes précipitations (Nystuen, 1986) et surtout dans les basses fréquences (He, 2010).

Dans les milieux d'eau douce non soumis au vent, aux précipitations, ou aux activités humaines, les valeurs de base varient de 40 à 60 dB re 1 μ Pa dans les étangs (Amoser et Ladich, 2005), de 30 à 100 dB re 1 μ Pa dans les lacs (Mann et al., 2007; Putland et Mensinger, 2019), et de 70 à 130 dB re 1 μ Pa dans les rivières (Nystuen, 1986). Le son ambiant sous un couvert de glace est de 83 dB re 1 μ Pa et peut atteindre 135 dB re 1 μ Pa lorsque la glace se fissure (Mann et al., 2009).

1.5.2 Sons anthropiques

La production de sons par les activités humaines en milieux d'eau douce rend le paysage acoustique subaquatique plus bruyant et hétérogène (Proulx et al., 2019). Les sons d'origine anthropique contribuent aussi à masquer les sons d'origine naturelle (Hawkins et al., 2015). Par exemple, le son de semi-remorques traversant un ruisseau a la capacité de masquer les signaux acoustiques du méné à queue noire (*Cyprinella venusta*) jusqu'à une distance de 12 mètres de la route (Holt et Johnston, 2015).

En eaux intérieures, le son d'origine anthropique provient généralement des bateaux de plaisance, des activités de pêche et des infrastructures humaines (Wysocki et al., 2006). Cependant, assez peu de données existent sur ces sons dans les lacs et rivières où il y a une faible profondeur. Pourtant, 43 % des Canadiens utilisaient des embarcations de plaisance en 2016, une augmentation de 8 % par rapport à 2012 (National Marine Manufacturers Association Canada, 2016). Les sons générés par la navigation de plaisance sur un lac peuvent élever de 10 dB re 1 μ Pa le son ambiant (Putland et Mensinger, 2019). En hiver, l'utilisation d'une perceuse à glace ou d'une motoneige augmente l'intensité sonore de 10 à 40 dB re 1 μ Pa au-dessus des valeurs de base (Mann et al., 2009; Putland et Mensinger, 2019). Sous la couverture de glace d'un lac fluvial en hiver, le son ambiant moyen les jours de semaine, lorsqu'il y a peu d'activité humaine, peut atteindre 65 dB re 1 μ Pa, tandis que la fin de semaine, lorsqu'un village de pêcheurs est actif, l'intensité sonore se situe plutôt autour de 90 dB re 1 μ Pa (Roca et al., 2018). Bien que ces sons soient plus intenses, leurs bandes de fréquences dominantes chevauchent les fréquences audibles pour une grande majorité d'espèces de poissons d'eau douce (Popper et Hasting, 2009; Slabbekoorn et al., 2010).

En milieu marin, le son anthropique est mieux documenté. Le trafic de bâtiments flottants contribue largement à la pollution sonore subaquatique dans ces écosystèmes (Gage et Axel, 2013; Hildebrand, 2009). L'intensité sonore de différentes catégories de navires s'étend entre 150 et 180 dB re 1 μ Pa à la source (l'endroit même où le son est généré), comparativement aux valeurs de référence qui se situent autour de 90 dB re 1 μ Pa (Veirs et al., 2016). La plupart des grands navires produisent des sons dominés par les basses fréquences (< 1 kHz) (Dyndo et al., 2015; Chion, 2017; Slabbekoorn et al., 2010). Par ailleurs, le maintien des chenaux maritimes

par le dragage engendre des sons de 107 à 190 dB re 1 μ Pa à la source (Mcqueen et al., 2019; Prideaux, 2017). D'autres activités anthropiques sont connues pour produire des sons de forte intensité (Prideaux, 2017) : les sonars militaires (jusqu'à 240 dB re 1 μ Pa à 1 mètre), les levés sismiques (260-262 dB re 1 μ Pa à 1 mètre), le battage de pieux (248-257 dB re 1 μ Pa à 1 mètre), le dynamitage (272-287 dB re 1 μ Pa à 1 mètre), les plateformes de forage (150 dB re 1 μ Pa à 1 mètre), ainsi que les turbines des centrales marémotrices (165-175 dB re 1 μ Pa à 1 mètre).

1.6 Détection du bruit par les poissons

1.6.1 Capacité auditive

Les poissons ont développé une vaste gamme de sensibilités auditives (Amoser et Ladich, 2005; Slabbekoorn et al., 2010). Environ 42 % des espèces de poissons vivent en eau douce et les deux tiers de celles-ci possèdent un appareil auditif spécialisé appelé l'organe de Weber (Natakani et al., 2011; Ladich et Schulz-Mirbach, 2016; Kunc et al., 2016). Les otophysiens forment un groupe taxonomique regroupant tous les poissons possédant l'organe de Weber, qui connecte mécaniquement la vessie natatoire à l'oreille interne (Ladich et Fay, 2013; Ladich et Schulz-Mirbach, 2016) (Figure 1.2). Ce groupe comprend quatre ordres avec approximativement 8 000 espèces, dont les cypriniformes et les siluriformes (Ladich et Schulz-Mirbach, 2016). Les otophysiens possèdent une meilleure sensibilité auditive, le plus souvent sur une plus grande plage de fréquences (Mann et al., 2007). Par exemple, les cyprinidés et les catostomidés entendent bien grâce à la présence de l'appareil de Weber, tandis que les salmonidés, les gadidés, les esocidés, les gastérostéidés, les percopsidés et les percidés entendent moins bien en l'absence de cette structure (Amoser et Ladich, 2005; Mann et al., 2007). L'hypothèse de la contrainte écoacoustique stipule que la capacité auditive reflèterait l'adaptation d'un poisson à son habitat (Ladich et Schulz-Mirbach, 2016). L'organe de Weber permettrait aux espèces dulcicoles habitant les milieux peu profonds de mieux entendre les hautes fréquences acoustiques, qui sont moins fortement atténuées par les effets d'interface eau-substrat que les basses fréquences. Par ailleurs, un environnement sonore plutôt calme favoriserait l'évolution d'une meilleure sensibilité auditive chez les poissons (Ladich et Schulz-Mirbach, 2016).

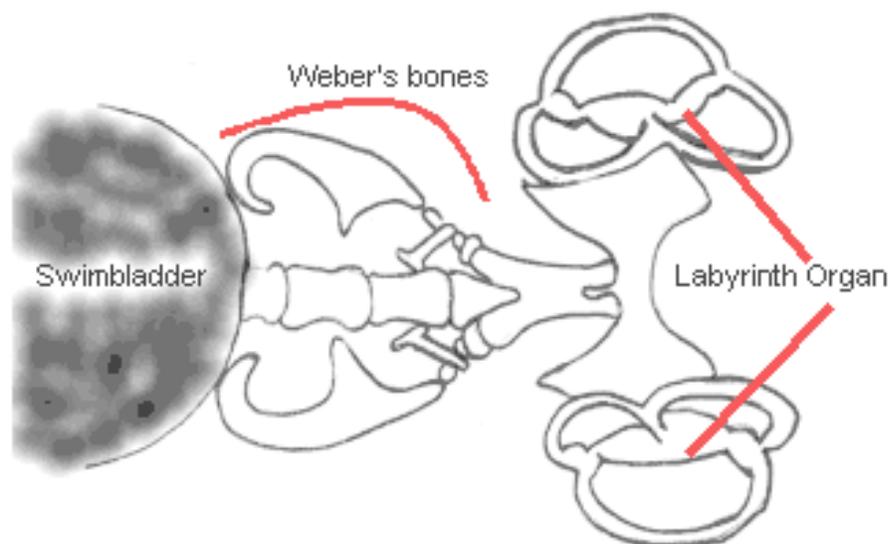


Figure 1.2 Représentation du système auditif des otophysiens. (Tirée de <https://speechlab.eece.mu.edu/dolittle/treeoflife/fish.htm>)

Il existe deux principaux modes de détection du son chez les poissons : l'oreille interne et la ligne latérale. La structure de l'oreille interne chez les poissons est semblable à celle des autres vertébrés (Popper et Hawkins, 2018). L'oreille interne est composée de trois canaux semi-circulaires ainsi que de trois paires d'otolithes (Figure 1.3). Les otolithes agissent comme accéléromètre chez les poissons osseux. Ils contiennent une structure calcaire dense, comparativement au reste du corps où la densité y est similaire à celle de l'eau. Les otolithes sont enchâssés dans une masse gélatineuse (l'endolymphe) tapissée d'une membrane de cellules ciliées (Ladich, 2014). Par conséquent, le va-et-vient des tissus avec l'onde sonore engendre une angulation des cellules ciliées stimulant les cellules sensorielles qui transmettent l'information au cerveau (He, 2010). L'oreille interne permet surtout de détecter les ondes de basse fréquence (He, 2010). On retrouve chez certaines espèces une connexion entre la vessie natatoire et l'oreille interne. Cette liaison peut être assurée par une chaîne d'osselets (organe de Weber) ou via l'extension de la vessie natatoire vers l'oreille interne (Braun et Grande, 2008). La ligne latérale, quant à elle, permet de détecter le son sur de courtes distances (environ 1 longueur de corps), et donc, de renseigner sur l'environnement immédiat (Ladich, 2014). Les deux modes de détection n'agissent pas sur la même portée.

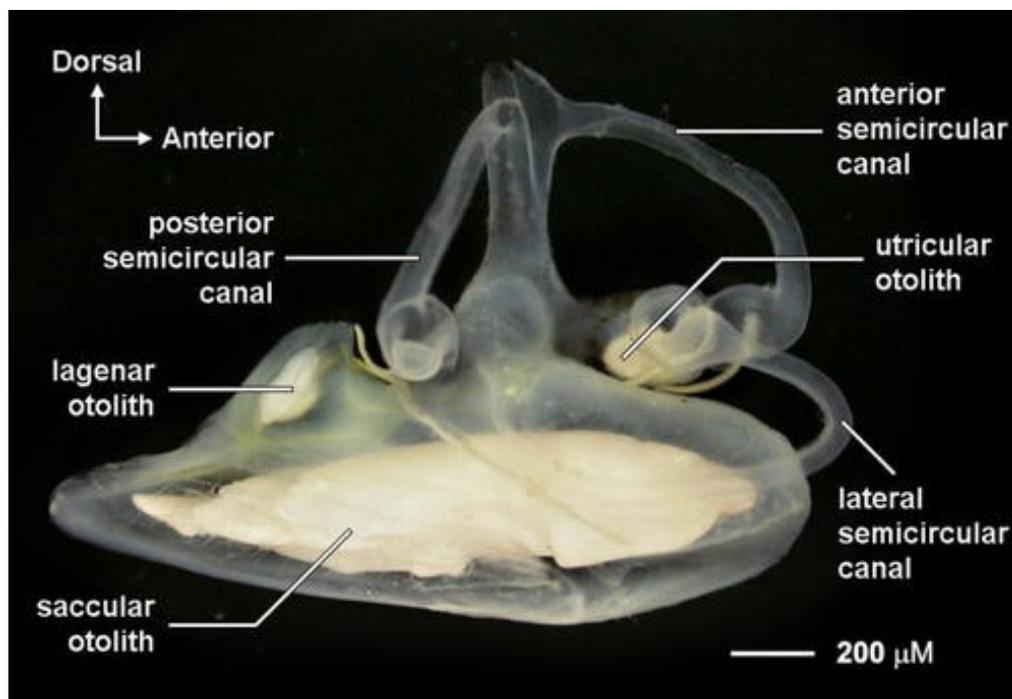


Figure 1.3 Oreille interne de l'antimora bleu (*Antimora rostrata*), un poisson téléostéen. (Tirée de Popper et Hawkins, 2018.)

Les espèces réagissent au son lorsqu'un seuil d'intensité est atteint pour une fréquence donnée. Ce seuil est souvent représenté par un spectrogramme de l'intensité sonore (dB re 1 μ Pa) en fonction de la fréquence (Hz) (Figure 1.4). Par conséquent, le seuil d'intensité auquel on remarque une réaction du poisson varie en fonction de la fréquence pour chaque espèce (Kastelein et al., 2008b). La majorité des poissons détecte les sons entre 50 Hz et 1500 Hz, et certaines espèces peuvent les percevoir des plus hautes fréquences (Popper et Hasting, 2009; Slabbekoorn et al., 2010).

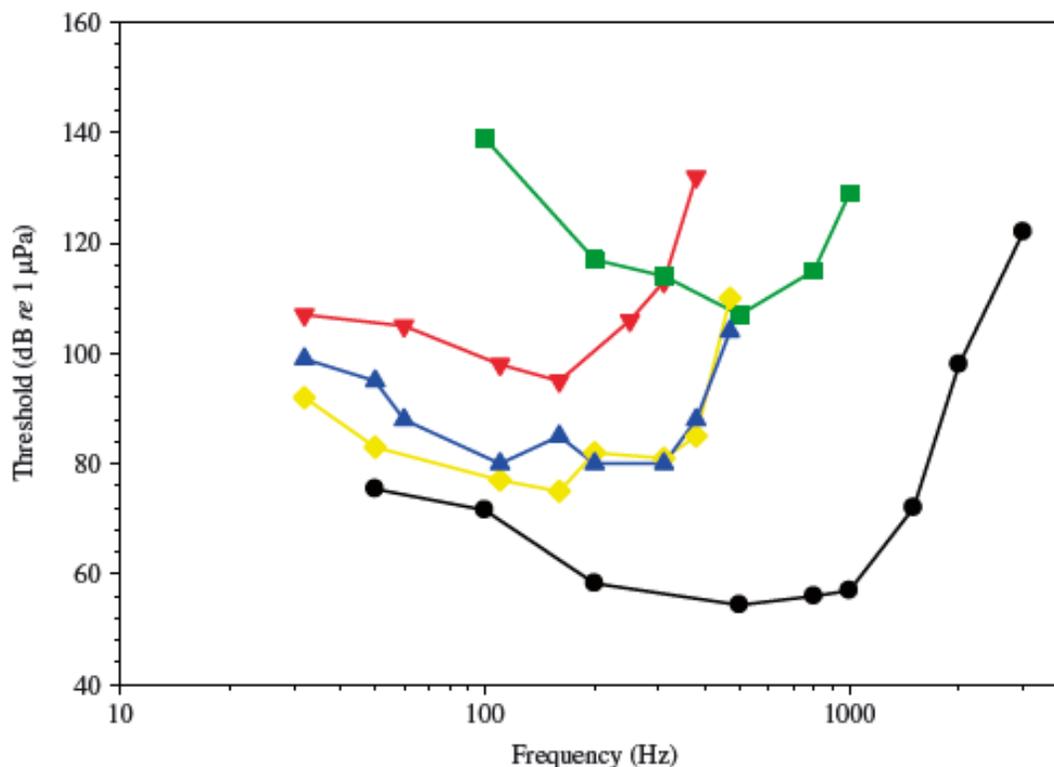


Figure 1.4 Seuils d'audition de cinq espèces de poissons; *Carassius auratus* en noir, *Salmo salar* en rouge, *Euthynnus sp.* en vert, *Gadus morhua* en jaune et *Melanogrammus aeglefinus* en bleu. (Tirée de Popper et Hasting, 2009.)

Deux méthodes ont été largement utilisées pour déterminer le seuil d'audition des poissons. La première s'appuie sur une réponse comportementale face à un son et la deuxième s'appuie sur une réponse électrophysiologique (Ladich et Fay, 2013) (Figure 1.5). Les méthodes électrophysiologiques les plus communes sont le potentiel auditif évoqué (angl. : *Auditory Evoked Potential*; AEP) et le taux de réponse du tronc cérébral (angl. : *Auditory Brainstem Response*; ABR).

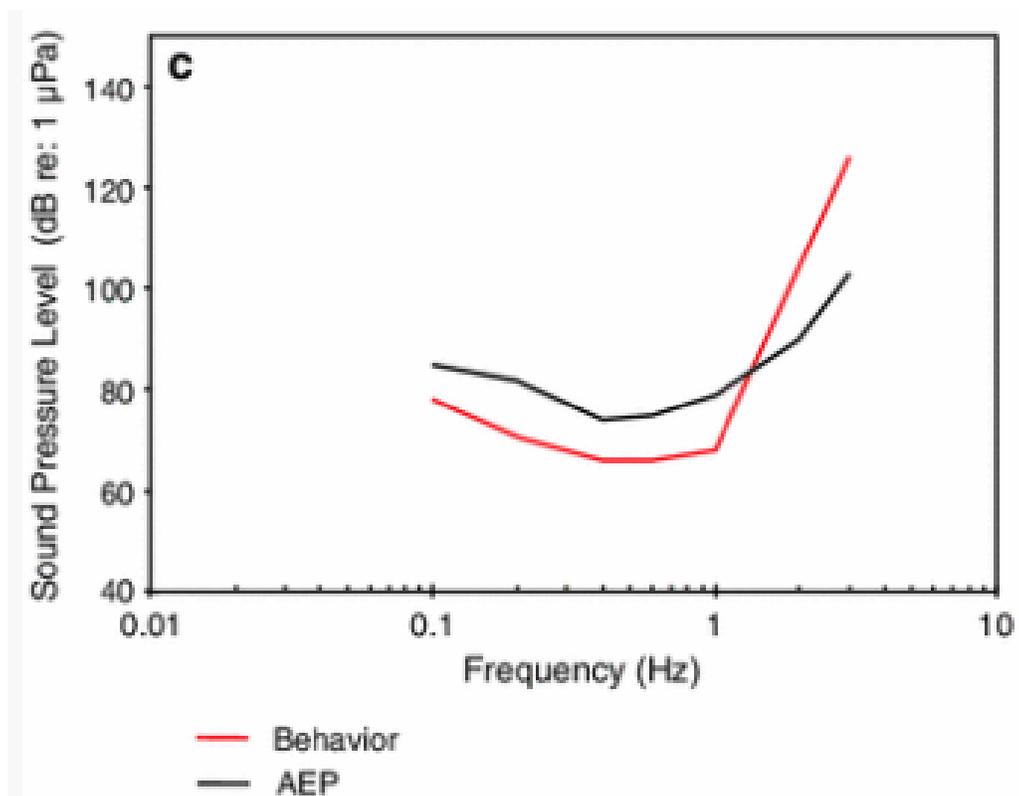


Figure 1.5 Sommaire dérivé de la médiane de l'audiogramme obtenu par la méthode comportementale (rouge) et de la réponse électrophysiologique pour le poisson rouge (*Carassius auratus*). (Tirée de Ladich et Fay, 2013.)

1.6.2 Importance du son pour le poisson

Le son apporte des informations sur la structure de l'environnement (Slabbekoorn et al., 2010; Hawkins et al., 2015; Kunc et al., 2016). Un récif corallien dégradé réduit la complexité et l'intensité du son ambiant et l'attraction du récif par les juvéniles de toutes espèces confondues est réduite de 8 % (Gordon et al., 2017). En quête de proies désorientées, des cyprinidés sont attirés par le son émanant du brassage de l'eau (Holt et Johnston, 2011). En contrepartie, un bruit blanc (angl. : *white noise*) de même intensité n'engendrait pas cette attraction chez ces cyprinidés. La qualité de l'habitat fait référence à des éléments fondamentaux à la survie du poisson, dont la présence de nourriture, de congénère, de prédateur, etc. La nature du son joue un rôle clé sur cette sélection de l'habitat, car elle apporte des informations sur sa qualité. Les poissons ont ainsi la capacité de percevoir les sons et d'en reconnaître la source (Hawkins et al., 2015).

1.6.3 Variabilité intra- et interspécifique de la sensibilité auditive

Les poissons possèdent une grande diversité morphologique de l'oreille interne et des structures auditives dites accessoires (Figure 1.6). Conséquemment, une grande variabilité interspécifique est observée dans la sensibilité auditive (Ladich et Schulz-Mirbach, 2016; Popper et Fay, 2011). Chez les structures accessoires, la présence de l'appareil de Weber et la taille de la vessie natatoire ont une influence directe sur l'étendue des fréquences et le seuil d'audition (Figure 1.7). La fréquence de résonance de la vessie natatoire varie négativement en fonction de la longueur du poisson (Proulx et al., 2019). La fréquence de résonance de la vessie natatoire est ainsi plus élevée pour des petits individus et diminue pour de grands individus. Par conséquent, pour une même espèce, le seuil auditif s'abaisse en fonction de la taille des individus (Lechner et al., 2011). Lorsqu'une onde de pression se propage dans l'eau et entre en contact avec la vessie natatoire emplie d'air, celle-ci vibre à la manière d'une structure tympanique. L'onde ainsi générée peut se propager jusqu'à l'oreille interne à travers l'organe de Weber, ou directement à travers les tissus du poisson. Il existerait donc un lien entre la sensibilité auditive des poissons et leur ontogénie.

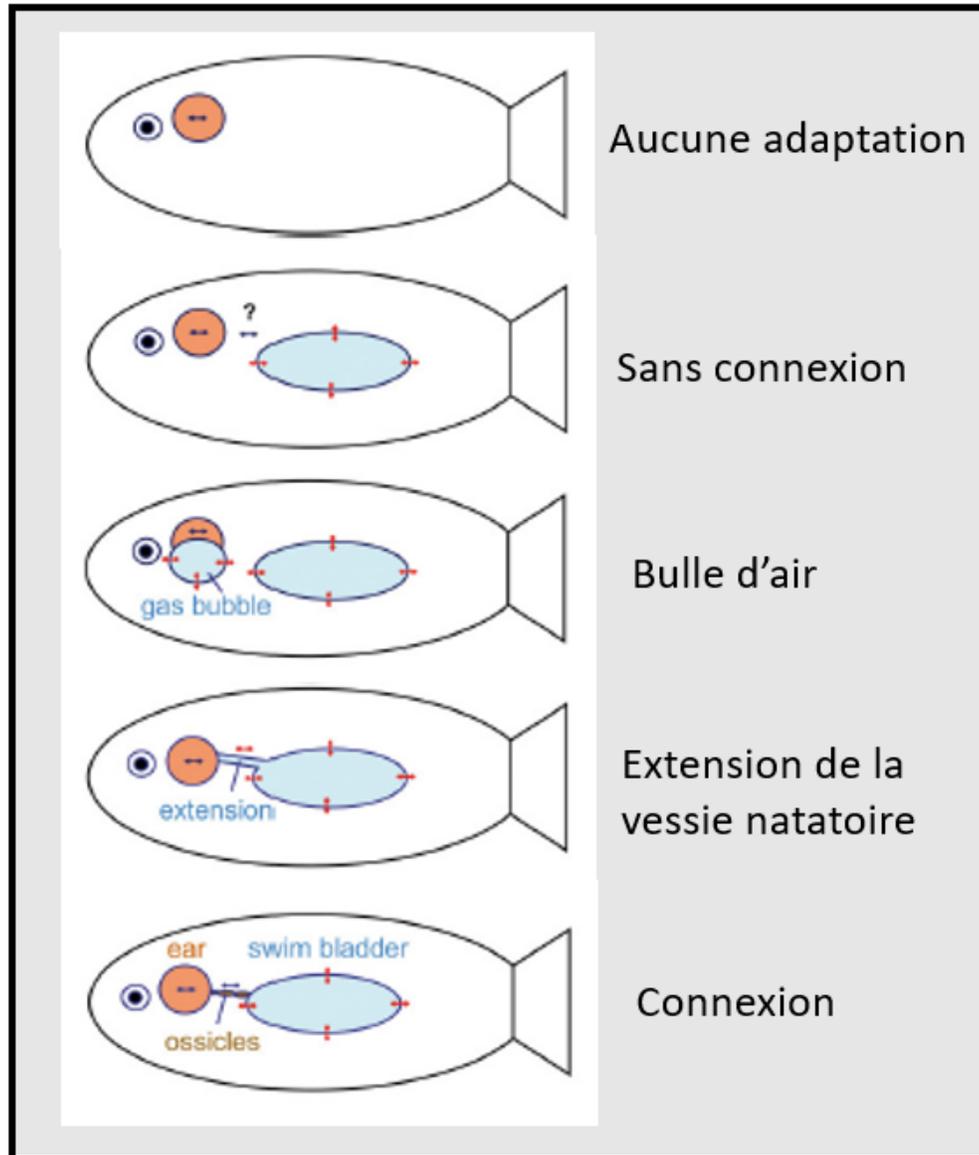


Figure 1.6 Cinq grands groupes d'adaptation auditive des poissons. Aucune adaptation : absence d'une vessie natatoire. Sans connexion : présence d'une vessie natatoire sans autre adaptation. Bulle d'air : présence d'une cavité d'air près de l'oreille interne. Extension de la vessie natatoire : présence d'une extension de la vessie natatoire jusqu'à l'oreille interne. Connexion : présence d'une connexion entre la vessie natatoire et l'oreille interne via une chaîne d'osselets. (Modifiée de Ladich et Schulz et Mirbach, 2016.)

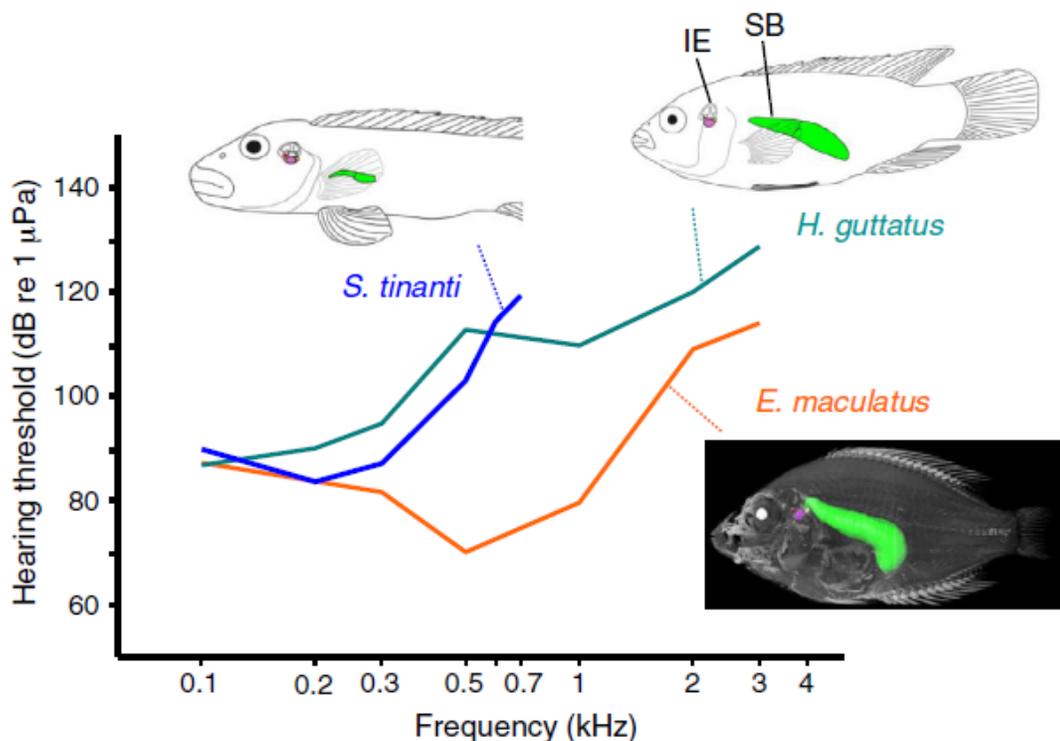


Figure 1.7 Relation entre la sensibilité auditive et les structures auditives des poissons de trois espèces de la famille des cichlidés; *Etroplus maculatus*, *Steatocranus tinanti* et *Hemichromis guttatus*. (Tirée de Ladich, 2014 et modifiée de Schulz et Mirbach, 2013.)

Il existe cependant une forte variation interspécifique et interindividuelle dans la sensibilité auditive des espèces. Par exemple, la sensibilité auditive change avec la dimension du corps chez le poisson-chat africain (*Lophiobagrus cyclurus*) (Lechner et al., 2011). Le seuil de détection des sons dépendrait aussi du stade de développement de l'appareil de Weber (Radford et al., 2014).

1.7 Réponses comportementales des poissons au son

Il existe une multitude de réponses comportementales au son chez le poisson (Cox et al., 2018). Parmi l'une d'elles, l'évitement est une réponse comportementale menant à un changement au niveau de la distribution spatiale. En fait, l'évitement engendre un déplacement horizontal ou vertical pour ne pas se retrouver confronté à un facteur de stress comme dans le cas d'un son anthropique (Fewtrell et McCauley, 2012; Murchy et al. 2017). Le risque causé par cette réponse comportementale est que les poissons déplacés pourraient décider d'éviter leur

habitat de façon permanente (Putland et al. 2018) ou rendre les individus vulnérables, car ils se retrouvent dans des habitats sous-optimaux. Plusieurs études se sont intéressées à ce comportement. En mer, des poissons comme le hareng évitent les passages de navires au large des côtes de la Norvège (Handegard et al., 2003; Vabø et al., 2002). Des bancs de poissons sont détectés en eau plus profonde quand l'échosondeur est monté sur un bateau plus bruyant (Brehmer et al., 2019). Dans une autre étude, un bateau muni d'un échosondeur quantifiait le nombre de poissons présents, indifféremment de l'espèce, selon deux traitements : à la dérive avec le moteur éteint (silencieux) ou en avançant avec un moteur à essence (bruyant). Le coefficient d'évitement différait entre les transects silencieux et bruyant dans un des lacs à l'étude; les poissons évitaient le traitement bruyant de façon plus marquée (Wheeland et Rose, 2014).

Certains auteurs se sont intéressés au son subaquatique comme barrière au déplacement d'espèces envahissantes. Le bruit d'un moteur hors-bord joué par un haut-parleur subaquatique à une intensité de 145-155 dB re 1 μ Pa (au-dessus du seuil de détection des espèces) s'est traduit par une réduction du nombre de passages (évitement) des carpes argentées (*Hypophthalmichthys molitrix*) et des carpes à grosse tête (*Hypophthalmichthys nobilis*) de plus de 90 % de part et d'autre d'une barrière acoustique (Murchy et al., 2017).

Il existe plusieurs autres réponses comportementales au son chez le poisson, incluant l'augmentation des déplacements, des soins au nid, du risque à la prédation, de la difficulté à s'alimenter et la baisse du succès reproducteur (Cox et al., 2018). À l'inverse, les conséquences négatives du son dues au stress chez un individu pourraient provoquer une réduction des mouvements et donc, une diminution de la prise de risques en général (Simpson et al., 2015; Purser et Radford, 2011; Spiga et al., 2017). Selon cette dernière théorie, le poisson limiterait ses déplacements pour analyser le facteur de stress qui le désoriente. Ainsi, le son anthropique réduirait momentanément la capacité du poisson à accomplir ses tâches. Il a été noté que les comportements anti-prédateurs se rétablissaient environ une vingtaine de minutes après l'exposition à des sons d'origine anthropique (Spiga et al., 2017). Après ce délai, la réponse comportementale des poissons était semblable avant et après le stress acoustique. En lac, la perchaude (*Perca fluviatilis*) nage plus vite lorsqu'un bateau se déplace sur le plan d'eau et

ce comportement se dissipe avec le temps d'exposition (Jacobsen et al., 2014). Exposée à des sons enregistrés et qui sont associés à un navire marchand, l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*) a montré une augmentation du taux métabolique dans 50 % des cas, ainsi qu'une réduction de ses déplacements et une augmentation du temps de réponse de 25 % (Simpson et al., 2015).

On se doit également de considérer la possibilité que les poissons soient attirés par certains sons d'origine anthropique, surtout s'ils sont d'intensité moyenne. Une des méthodes de pêche traditionnelles japonaises consiste à utiliser un leurre sonore pour attirer les dorades japonaises (*Pagrus major*) dans un secteur voulu (He, 2010). Une pièce de métal en forme de cloche à vache (donburi) est lancée de l'embarcation. Après avoir percuté la surface de l'eau, l'objet coule laissant s'échapper dans sa descente une colonne de bulles. Le son émanant du leurre atteint 130 dB re 1 μ Pa lors de l'impact et de 110 dB re 1 μ Pa lorsqu'il coule. D'autres événements anecdotiques mentionnent qu'il y a attraction des centrarchidés lorsqu'on agite l'eau en surface. En revanche, il est difficile de dissocier si le comportement d'attraction provient du son de l'objet ou de l'objet lui-même.

Le son anthropique est constitué d'une diversité de sources ayant des spectres sonores distincts. Le type de bateau ainsi que le type et la force du moteur détermineront le spectre sonore. Les moteurs deux forces et quatre forces à essence produisent des sons différents et ont des effets différents sur le temps de réaction du poisson qui est plus faible pour le moteur deux forces que pour le moteur quatre forces (McCormick et al., 2019). Il reste que le stress comportemental causé par les sons anthropiques demeure imprédictible, car les effets observés sur les poissons varient en fonction des différentes espèces et individus. Il devient difficile de quantifier l'impact du son anthropique à l'échelle d'un écosystème.

1.8 Approches expérimentales

1.8.1 Approche directe

L'approche directe consiste à utiliser le son anthropique généré par une activité humaine afin d'évaluer son impact sur la faune en milieu naturel. La pollution sonore ainsi recréée est

semblable à celle retrouvée dans les écosystèmes aquatiques. Néanmoins, dans ce genre d'expérience, le son n'est pas le seul facteur à prendre en considération (Vabø et al., 2002; Handegard et al., 2003; Jacobsen et al. 2014), car la vue du bateau ou de l'engin de pêche, ou même la vague engendrée par le bateau peuvent effaroucher les poissons (Wolter et Arlinghaus, 2003; De Robertis et Handegard, 2013; Brehmer et al., 2019). Dans de tels cas, il est possible de stipuler un comportement d'évitement face à une embarcation, mais pas face à un son. Les moyens de contrer les facteurs confondants risquant d'avoir un effet comportemental ou physiologique sur le poisson ne sont souvent pas pris en considération.

1.8.2 Expériences de réécoute

Les méthodes de réécoute (angl. : *playback*) permettent de mener des expériences contrôlées et répliquées sur l'impact du son anthropique sur la faune. C'est un outil souvent utilisé afin d'isoler la variable « bruit » des autres facteurs susceptibles d'influencer la réponse de la faune. L'expérience de réécoute consiste à enregistrer un son et de le faire jouer via un haut-parleur submersible afin de recréer un environnement sonore. La réponse de la faune peut ensuite être évaluée de différentes manières. Toutefois, le son rejoué ne reproduit pas intégralement le spectre sonore original; par exemple le signal sonore d'un bateau peut dépasser ce même son rejoué dans un haut-parleur (Holles et al., 2016). Afin de vérifier que le son rejoué possède le spectre sonore souhaité, un ajustement du haut-parleur doit être fait à l'avance.

1.8.3 Expériences en laboratoire

Pour isoler l'effet du son des autres variables environnementales confondantes, deux types d'expériences en laboratoire sont menés : directe et de réécoute. Néanmoins, les expériences conduites en laboratoire ont montré que les bassins modifient la qualité spectrale du son et les poissons ne peuvent quitter la zone sonorisée (Akamatsu et al., 2002; Bruintjes et Radford, 2014; Voellmy et al., 2014; Braun, 2015). Il est donc difficile d'en évaluer les divers comportements comme l'évitement. En milieu contrôlé, les poissons ne réagissent pas toujours au son. Par exemple, les bruits de bateau peuvent être ni attractifs ni répulsifs pour le poisson (Braun, 2015).

1.9 Objectifs et prédictions

Pour comprendre les impacts de la pollution sonore, il est important de considérer l'audition du poisson, mais également son habitat sonore. En guise de référence, il est nécessaire de recenser préalablement l'acuité auditive des poissons d'eau douce ainsi que d'établir un portrait acoustique du paysage subaquatique d'eau douce.

L'objectif principal de l'étude est d'évaluer le comportement d'évitement des poissons d'eau douce à un son anthropique dans un système naturel et à l'échelle des communautés. De ce fait, le plan d'eau ciblé était le lac Saint-Pierre, situé entre les villes de Sorel et Trois-Rivières dans la province de Québec au Canada. Une approche de type BACI (Before-After-Control-Impact) a été préconisée pour répondre à l'objectif. Pour ce faire, des pêches expérimentales ont été menées afin de comparer l'abondance des captures par espèce par filet-trappe entre des sites ayant des sons ambiants et ceux soumis aux bruits de moteur.

On s'attend à ce que les espèces de poissons possédant une adaptation auditive (connexion entre la vessie natatoire et l'oreille interne ou une extension de la vessie natatoire) évitent davantage le bruit des moteurs que celles qui en sont dépourvues.

CHAPITRE II

ÉVITEMENT DU SON ANTHROPIQUE PAR LES POISSONS D'EAU DOUCE

La version anglaise du présent article scientifique sera soumise
au périodique *Ecological Applications*.

2.1 Résumé

Les poissons d'eau douce présentent un large éventail d'adaptations et de capacités auditives, qui sont supposées les aider à naviguer dans leur environnement, à éviter les prédateurs et à trouver des partenaires potentiels. Pourtant, nous savons très peu de choses sur la réponse des poissons aux sons dans leur environnement, ou sur la façon dont les poissons avec des adaptations auditives particulières réagissent à différents paysages sonores subaquatiques. Nous présentons ici une synthèse de l'acuité auditive chez les poissons en fonction de leurs adaptations auditives. Nous réalisons ensuite un portrait des paysages subaquatiques d'eau douce afin de représenter l'étendue des ambiances et événements acoustiques dans les lacs et rivières. Enfin, nous montrons comment la réponse comportementale de 30 espèces de poissons dans un lac fluvial du Saint-Laurent (Québec, Canada) est corrélée à la présence ou à l'absence de différentes adaptations auditives. Nos résultats montrent que la présence de spécialisations acoustiques chez les poissons abaisse le seuil auditif et augmente la fréquence sensible d'audition. Les sons anthropiques dans l'environnement augmentent le niveau sonore ambiant et dominant dans les fréquences sensibles d'audition des poissons. Ultimement, les sons de moteur entraînent un évitement chez les espèces de poissons avec des adaptations acoustiques qui augmentent leur acuité auditive. Nos résultats offrent des pistes d'étude sur les forces sélectives et/ou les contraintes conduisant à la grande diversité d'adaptation auditive chez les poissons d'eau douce.

2.2 Introduction

La pollution sonore des milieux aquatiques est considérée comme une nuisance pour les organismes vivants (Slabbekoorn et al., 2010; Simmonds et al. 2014; Shannon et al., 2016). Le transport maritime, le dragage, l'exploration sismique et l'installation de structures subaquatiques sont autant de sources de cette pollution sonore (McQueen et al., 2019; Prideaux, 2017). Les navires marchands en particulier sont connus pour affecter négativement le comportement de plusieurs groupes taxonomiques, incluant les grands mammifères (Richardson, 1995; Chion et al. 2017) et les poissons en milieu marin (Vabø et al., 2002; Handegard et al., 2003; Picciulin et al., 2010; Fewtrell et McCauley, 2012; Whitfield et Becker, 2014). Cependant, la littérature est encore fragmentaire en ce qui concerne l'impact de la pollution sonore dans les milieux d'eau douce, notamment chez les poissons (Mickle et Higgs, 2017; Cox et al., 2018; Roca et al. 2018; Popper et al., 2019; Pieniazek et al., 2020).

Le portrait sonore des paysages subaquatiques d'eau douce diffère considérablement des paysages marins. La plus faible profondeur des milieux d'eau douce combinée aux changements du relief, du type de substrat et de l'hydrodynamique rendent le paysage acoustique subaquatique particulièrement hétérogène (Kuehne et al., 2013; Proulx et al., 2019). Par exemple, l'étude du paysage acoustique en rivière montre de fortes variations de l'intensité sonore et de la signature spectrale sur de courtes distances et en fonction du régime d'écoulement (Wysocki et al., 2007; Tonolla et al., 2010; 2011; Kacem et al., 2020). En eau douce, les sons d'origine anthropique proviennent surtout des bateaux de plaisance, des activités de pêche, de l'entretien et la pose d'infrastructures en berge (Wysocki et al., 2006; Whitfield et Becker, 2014). Cependant, aucune étude n'a encore réalisé un portrait détaillé du paysage subaquatique en eau douce qui permettrait de représenter toute l'étendue des ambiances et événements acoustiques auxquels les poissons sont exposés.

Les poissons ont développé une vaste gamme d'adaptations auditives au fil de leur évolution (Amoser et Ladich, 2005; Slabbekoorn et al., 2010). Par exemple, les deux tiers des espèces de poissons vivant en eau douce possèdent un appareil auditif spécialisé qu'on appelle l'appareil de Weber (Natakani et al., 2011). Il est possible de catégoriser l'ensemble des adaptations auditives chez les poissons en cinq grands groupes (Ladich et Schulz-Mirbach,

2016; Wiernicki et al., 2020) : 1) présence d'une extension de la vessie natatoire jusqu'à l'oreille interne, 2) présence d'une connexion entre la vessie natatoire et l'oreille interne via une chaîne d'osselets (c.-à-d., appareil de Weber), 3) présence d'une cavité d'air près de l'oreille interne, 4) présence d'une vessie natatoire sans autre adaptation, 5) absence d'une vessie natatoire. Certains chercheurs proposent d'ailleurs de distinguer la susceptibilité des poissons à la pollution sonore subaquatique en fonction de ces groupes d'adaptation (Popper et Hawkins, 2019). Plusieurs pays révisent actuellement les critères d'exposition à la pollution sonore subaquatique (UN, 2018), ce qui permettra de mieux prendre en compte le rôle des adaptations auditives dans la réponse des poissons.

Un des comportements anticipés chez les poissons soumis à la pollution sonore est l'évitement. L'évitement se traduit par une perte d'habitat pour le poisson, qui peut être temporaire ou permanente. Des expériences menées chez des poissons captifs (Pearson et al., 1992; Fewtrell et McCauley, 2012; Neo et al., 2015; Murchy et al., 2017) et des poissons libres de mouvement (Vabø et al., 2002; Handegard et al., 2003; Picciulin et al., 2010; Wheeland et Rose, 2014; Brehmer et al., 2019) suggèrent que l'évitement aux bateaux motorisés n'est pas systématique et qu'il est probablement relié à l'affiliation phylogénétique. Une expérience d'évitement aux sons de bateaux à moteur a été réalisée dans la région des Grands Lacs, Canada, sur des poissons libres de mouvement (Pieniazek et al., 2020). L'expérience consistait à un traitement d'enrichissement sonore par réécoute (angl. : *playback*). Parmi les familles recensées, les poissons appartenant aux Cyprinidae et Gobidae montraient un comportement d'évitement, alors que ceux appartenant aux Centrachidae et Percidae étaient indifférents (Pieniazek et al., 2020). Ces résultats suggèrent que les poissons avec une sensibilité auditive plus élevée évitent la pollution acoustique, même à des niveaux faibles d'intensité sonore.

L'objectif général de notre étude est d'évaluer le comportement d'évitement des poissons d'eau douce au son émanant d'un bateau à moteur en milieu naturel et à l'échelle de la communauté. Nous présentons dans un premier temps une synthèse de l'acuité auditive chez les poissons en fonction de leurs adaptations auditives. Nous réalisons ensuite un portrait des paysages subaquatiques d'eau douce afin de représenter l'étendue des ambiances et événements acoustiques dans les lacs et rivières. Enfin, nous menons une expérience d'enrichissement

sonore de type BACI (Before-After-Control-Impact) dans la zone littorale d'un grand lac fluvial. Nous posons l'hypothèse que les espèces de poissons possédant une adaptation auditive évitent davantage le bruit des bateaux à moteur.

2.3 Matériel et méthodes

2.3.1 Synthèse de l'acuité auditive des poissons

Les seuils auditifs des poissons ont été compilés à partir des audiogrammes publiés dans la littérature (Ladich et Fay, 2013; Mann et al, 2007; Nedwell et al., 2004). Lorsque les données étaient présentées uniquement sous forme graphique, nous les avons extraites à l'aide du logiciel WebPlotDigitizer (Rohatgi, 2021). Au total, les données de 185 seuils auditifs de 156 espèces ont été récupérées, dont 98 seuils auditifs de poissons d'eau douce et 87 de poissons d'eau salée. Les cinq groupes d'adaptation auditive y étaient représentés : 1) présence d'une extension de la vessie natatoire jusqu'à l'oreille interne (Eau douce : n = 2, Eau salée : n = 18), 2) présence d'une connexion entre la vessie natatoire et l'oreille interne via une chaîne d'osselets (Eau douce : n = 46, Eau salée : n = 2), 3) présence d'une cavité d'air près de l'oreille interne (Eau douce : n = 13), 4) présence d'une vessie natatoire sans autre adaptation (Eau douce : n = 31, Eau salée : n = 53) et 5) absence d'une vessie natatoire (Eau douce : n = 6, Eau salée : n = 14). Pour chaque audiogramme, le seuil auditif (dB re 1 μ Pa) et la fréquence sensible (Hz) ont été extraits. Le seuil auditif correspond au niveau de pression acoustique (angl. : *sound pressure level*; SPL) le plus faible détecté par le poisson, alors que la fréquence sensible correspond à la fréquence associée à ce seuil auditif.

2.3.2 Portrait sonore du paysage subaquatique

Des enregistrements de sons subaquatiques ont été pris pendant la période de juin à octobre 2019. La stratégie d'échantillonnage reposait sur le principe que l'hydrophone sous l'eau représente la position d'un poisson à un endroit et un instant donné. L'échantillonnage n'était pas réalisé selon une procédure de choix aléatoire, mais plutôt de manière à représenter une vaste gamme de plans d'eau, de sons ambiants et d'événements anthropiques.

À partir de la rive ou en embarcation, un hydrophone piézoélectrique a été plongé dans l'eau à une profondeur de 1 m afin de réaliser l'enregistrement des séquences audio. Les enregistrements ont recensé 41 séquences de sons ambiants et 98 évènements anthropogéniques (Annexes A et B). Les évènements acoustiques se composaient de sons anthropogéniques, issus par exemple de bateaux de plaisance, de navires marchands, de leurres de pêche, de baigneurs, ou d'activités portuaires. Les sons ambiants se caractérisaient par l'absence d'évènement anthropogénique, souvent au sein du même plan d'eau. Par exemple, une séquence audio pouvait être enregistrée lors du passage d'une embarcation motorisée, puis une autre lorsque le fond sonore retrouvait son niveau ambiant de fond sonore. Chaque enregistrement a été écouté afin de conserver des séquences sans interférences (p. ex., frottement de la végétation sur la sonde de l'hydrophone, effet des vagues sur le bateau).

Les séquences audio ont été enregistrées à l'aide d'un appareil numérique portatif (H2n Handy Recorder, Zoom, Tokyo, Japan) connecté à un hydrophone H1 et un amplificateur PA4 (Aquarian Scientific, Anacortes, USA). Le système d'enregistrement avait une entrée maximale de 10 V (rms), un gain à 20 dB et une sensibilité de -190 dB re 1 V/ μ Pa sur la plage de fréquence 10-3000 Hz (Kacem et al., 2020; Roca et al., 2018). Les séquences audio ont été enregistrées en format WAV 16 bits à un taux de 44,1 kHz. Les 41 sons ambiants et 98 évènements acoustiques anthropogéniques retenus avaient une durée variant entre 5 et 20 secondes.

L'intensité sonore exprimée sur une échelle de SPL, référencée en dB re 1 μ Pa, a été calculée avec les fonctions PAMGuide (Merchant et al., 2015). La moyenne quadratique (SPL_{RMS} dB re. 1 μ Pa) a été obtenue par intervalle de 5 Hz sur la plage de fréquences 100-2000 Hz. L'ensemble des spectrogrammes sont représentés dans l'annexe C. Pour chaque signature spectrale d'une séquence audio, nous avons récupéré l'intensité maximale (max SPL) et la fréquence dominante (Hz). L'intensité sonore maximale correspond au SPL le plus élevé sur la plage de fréquences, alors que la fréquence dominante est celle associée au max SPL.

2.3.3 Expérience d'enrichissement sonore

2.3.3.1 Site d'étude

L'expérience d'enrichissement sonore a été menée au lac Saint-Pierre, Québec, Canada ($46^{\circ}12'7,42''N$; $-72^{\circ}49'22,18''O$) (Figure 2.1). Il s'agit d'un élargissement du fleuve Saint-Laurent d'environ 40 kilomètres de long par 14 kilomètres de large entre les villes de Sorel-Tracy et Trois-Rivières. La profondeur moyenne y est de 2,7 mètres (De la Chenelière et al., 2014). Ce tronçon du fleuve est notamment soumis aux sons anthropiques subaquatiques de navires marchands circulant dans la voie maritime et des embarcations de plaisance motorisées. C'est aussi un lieu de prédilection pour les amateurs de pêche et d'activités nautiques. On y retrouve une communauté de poissons diversifiée avec 78 espèces, soit 72 % des espèces d'eau douce du Québec (Benoit et al. 1987). Le lac Saint-Pierre est un secteur d'intérêt pour la conservation, qui a été désigné réserve de biosphère par l'UNESCO en 2000.

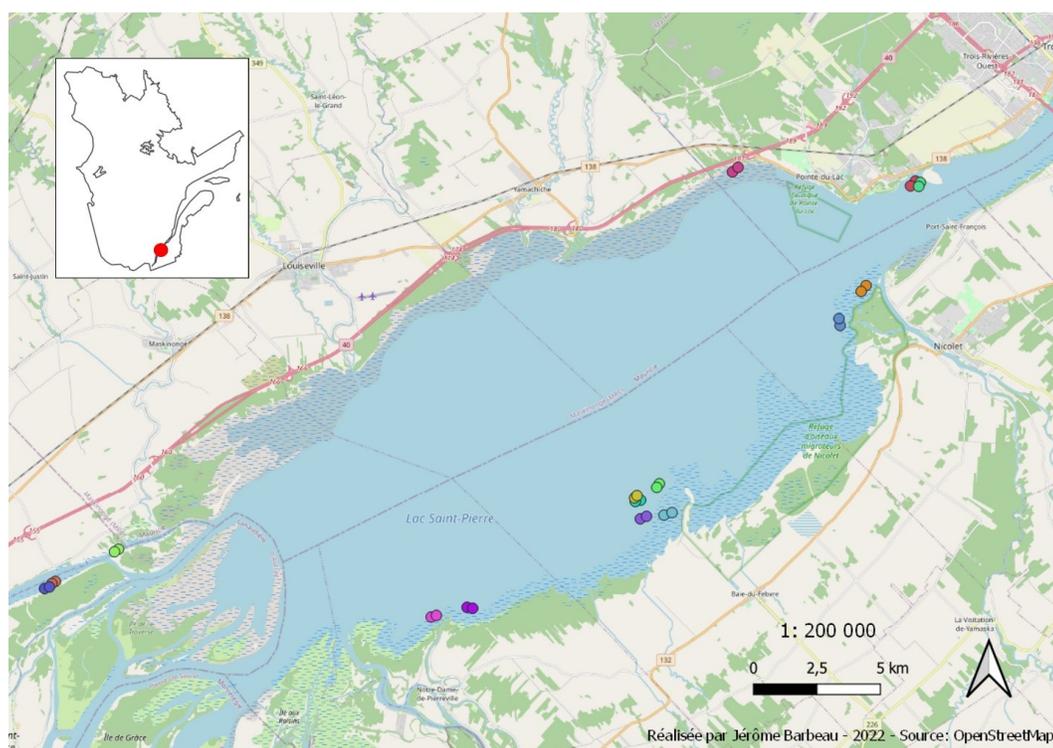


Figure 2.1 Répartition spatiale des engins de pêche utilisés dans les expériences d'enrichissement sonore au lac Saint-Pierre (Québec, Canada) à l'été 2020. Chaque couleur correspond à un site de pêche.

2.3.3.2 *Plan d'expérience*

Les pêches expérimentales ont été menées de juin à octobre 2020. Les secteurs ciblés étaient des zones peu profondes (1,5 à 2 mètres), de faible courant et à proximité d'herbiers aquatiques. Les engins de capture utilisés dans le cadre de l'expérience étaient des filets-trappes de type Alaska. Les engins sont constitués de deux ailes de 15 mètres dirigeant les poissons vers une cage de rétention de 1,2 m de haut par 1,8 m de large. Les filets-trappes sont déployés au fond du lac et capturent les poissons de manière passive. Les poissons doivent se déplacer dans la cage de rétention afin d'être capturés.

Chaque répétition de l'expérience consistait en deux filets-trappes déployés simultanément à plus de 100 mètres de distance l'une de l'autre sur une période de trois heures. Une trappe servait de référence et l'autre de traitement d'enrichissement sonore. Une embarcation en aluminium était ancrée à deux mètres derrière la cage de rétention d'une des deux trappes afin que les poissons en approche ne puissent pas la voir. L'entrée de la trappe était enrichie en sons grâce à un moteur monté sur l'embarcation. Le moteur employé pour l'enrichissement sonore était un Yamaha quatre temps 9,9 HP en marche et embrayé, afin de faire tourner l'hélice. Ce type de moteur est couramment utilisé au lac Saint-Pierre par les plaisanciers. Le son du moteur à la trappe du traitement d'enrichissement sonore n'était pas perceptible par les poissons à la trappe du traitement de référence. Après les trois premières heures de pêche, un premier dénombrement des poissons présents dans les cages de rétention des deux trappes était effectué. Les poissons ont été identifiés à l'espèce et leurs longueurs mesurées. Ensuite, les trappes étaient redéployées aux mêmes endroits pour une autre période de trois heures, mais l'embarcation et le moteur étaient déplacés à l'autre filet-trappe (Figure 2.2). Un dénombrement des poissons capturés était de nouveau réalisé. Au total, ce sont 15 journées de pêche qui ont été réalisées, soit 15 sites, 30 stations et 60 déploiements de trappes. Plusieurs périodes de la journée ont été ciblées au fil de la saison : tôt le matin, en journée, le soir et à la nuit tombée. La réduction du nombre de captures par période de pêche a été utilisée comme indicateur d'évitement. Le protocole de l'étude a été approuvé par le comité de bons soins aux animaux de l'Université du Québec à Trois-Rivières (certificat #2020-R.P.1).

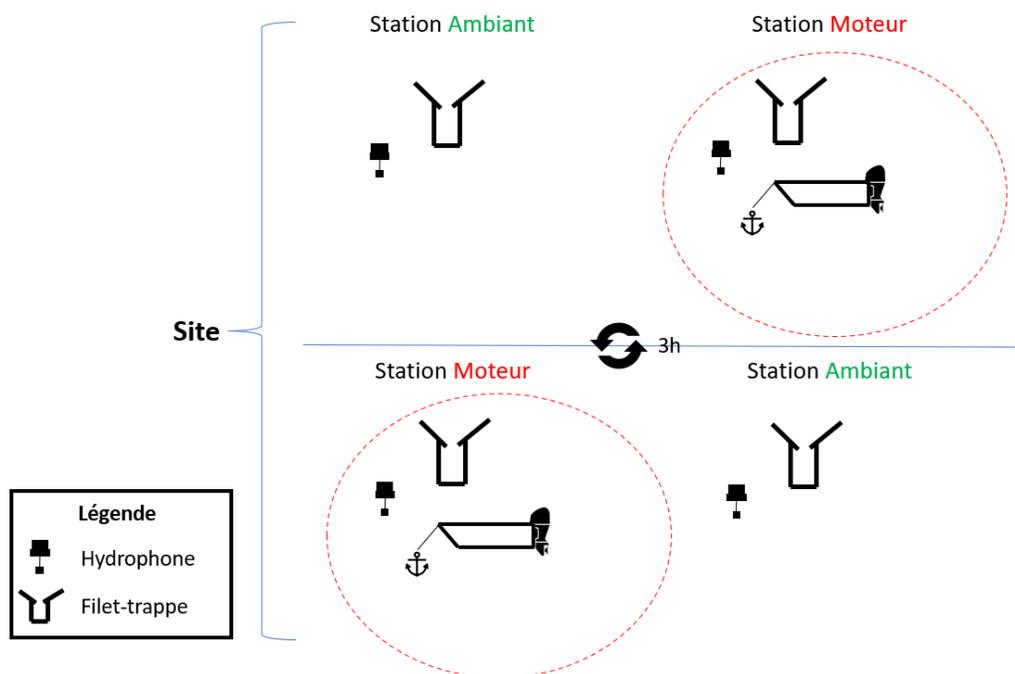


Figure 2.2 Représentation d'un site de pêche.

Tout au long des expériences d'enrichissement sonore, des hydrophones étaient déployés à l'entrée des cages de rétention des trappes afin de caractériser l'environnement acoustique subaquatique. Les séquences audio ont été analysées suivant la procédure décrite à la section *Portrait sonore du paysage subaquatique*. Les valeurs d'intensité sonore maximale (max SPL) à la fréquence dominante ont été récupérées pour les analyses subséquentes.

2.3.3.3 Analyses statistiques

Nous avons utilisé une modélisation hiérarchique des communautés d'espèces (HMSC) (Ovaskainen et al. 2017, Ovaskainen et Abrego 2020) pour examiner les réponses des poissons à l'augmentation de la pollution sonore induite expérimentalement par le moteur du bateau. Statistiquement, la modélisation HMSC est un modèle mixte généralisé et multivarié qui représente la réponse conjointe de toutes les espèces aux covariables utilisées dans le modèle. En plus du traitement (avec ou sans sons de moteurs) et des covariables environnementales, le modèle peut intégrer les caractéristiques du plan d'échantillonnage, les traits fonctionnels des espèces et les relations phylogénétiques. Les décomptes par espèce suivaient une distribution de Poisson dont la moyenne était modélisée sur une échelle logarithmique en fonction d'un

prédicteur linéaire comprenant le traitement (c.-à-d., avec ou sans sons de moteur) et deux termes d'effets aléatoires : un pour la localisation spatiale et un autre pour le l'appariement BACI. Le traitement d'enrichissement sonore était codé comme un facteur binaire. L'effet du traitement a été modélisé en fonction d'un seul trait fonctionnel, soit la présence/absence d'une catégorie d'adaptation auditive aussi codée comme un facteur binaire. Dans un premier temps, nous avons obtenu une phylogénie des espèces en utilisant les extensions ape (Paradis et al., 2004) et fishtree (Chang et al., 2019) dans R (Figure 2.3). Dans un deuxième temps, nous avons utilisé la structure de corrélation phylogénétique d'Ives et Helmus (2011) dans l'extension Hmsc de Tikhonov et al. (2020) pour modéliser la covariation entre les espèces. Après avoir pris en compte les effets aléatoires, le modèle nous a permis d'évaluer si l'abondance des espèces avec des adaptations auditives particulières diffère entre les traitements avec ou sans enrichissement sonore.

L'ajustement du modèle a été réalisé selon une approche bayésienne. Nous avons utilisé les distributions par défaut dans l'extension Hmsc. L'estimation des paramètres a été obtenue à l'aide de l'algorithme Markov Chain Monte-Carlo (MCMC) implémenté dans Hmsc. Une seule chaîne MCMC a été exécutée sur 500 000 itérations; les 100 000 premières ont été traitées comme une phase d'entraînement et ont été rejetées. Les itérations restantes ont été réduites (1:100) pour générer une distribution de 4 000 itérations. La convergence de la chaîne a été évaluée selon le critère de Gelman-Rubin implémenté dans l'extension rstan de R (Stan Development Team, 2022).

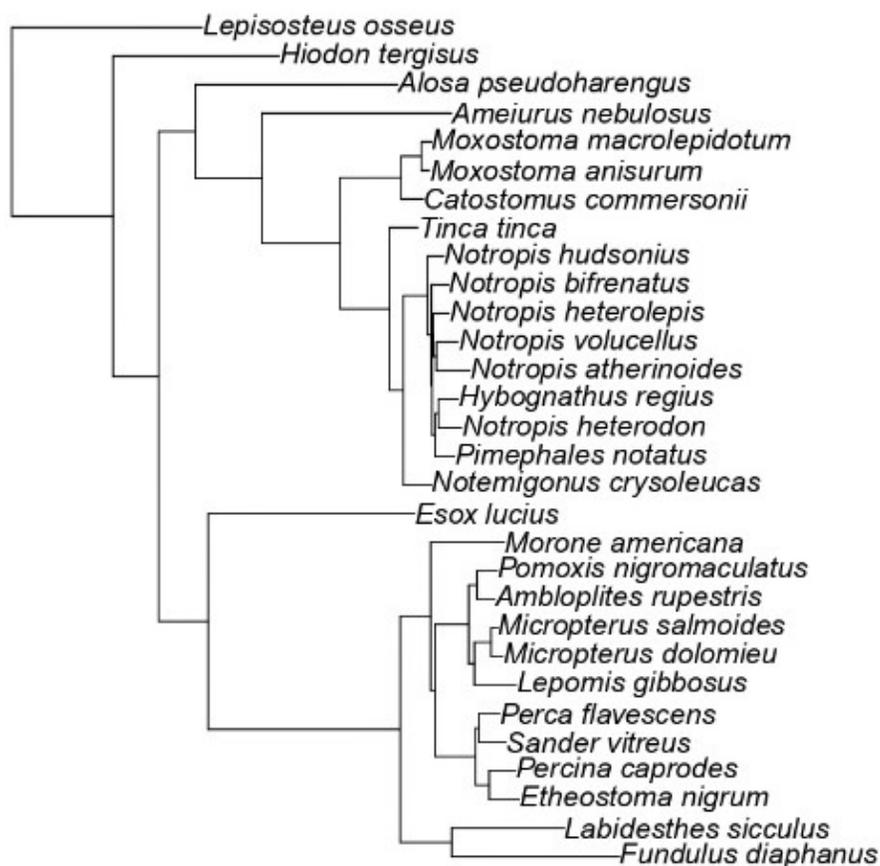


Figure 2.3 Relations phylogénétiques des 30 espèces de poissons de l'étude.

2.4 Résultats

2.4.1 Synthèse de l'acuité auditive des poissons

La présence d'adaptations auditives abaisse le seuil auditif des poissons et augmente la fréquence sensible d'audition (Figure 2.4). Lorsque l'on passe du groupe « sans adaptation » au groupe « connexion » chez les poissons d'eau douce, le seuil d'audition diminue de 102 à 72 dB en moyenne. Cette diminution est observable tant chez les poissons d'eau douce que d'eau salée. Par ailleurs, les fréquences sensibles des poissons d'eau douce avec une connexion entre l'oreille interne et la vessie natatoire sont en moyenne plus élevées à 780 Hz. Les groupes « sans adaptation » et « sans connexion » présentent des fréquences sensibles plus faibles entre 150 et 350 Hz en moyenne. Le constat est similaire pour les poissons d'eau salée, dont la

fréquence sensible moyenne est de 1600 Hz pour le groupe « connexion », comparativement à des fréquences sensibles moyennes autour de 300 Hz pour les autres groupes. Les différences de fréquence sensible entre les poissons d'eau douce et d'eau salée semblent plus marquées pour le groupe « connexion ». Cependant, aucune conclusion statistique ne peut être tirée en raison de l'échantillonnage non aléatoire des espèces et du faible effectif pour certains groupes d'adaptation auditive.

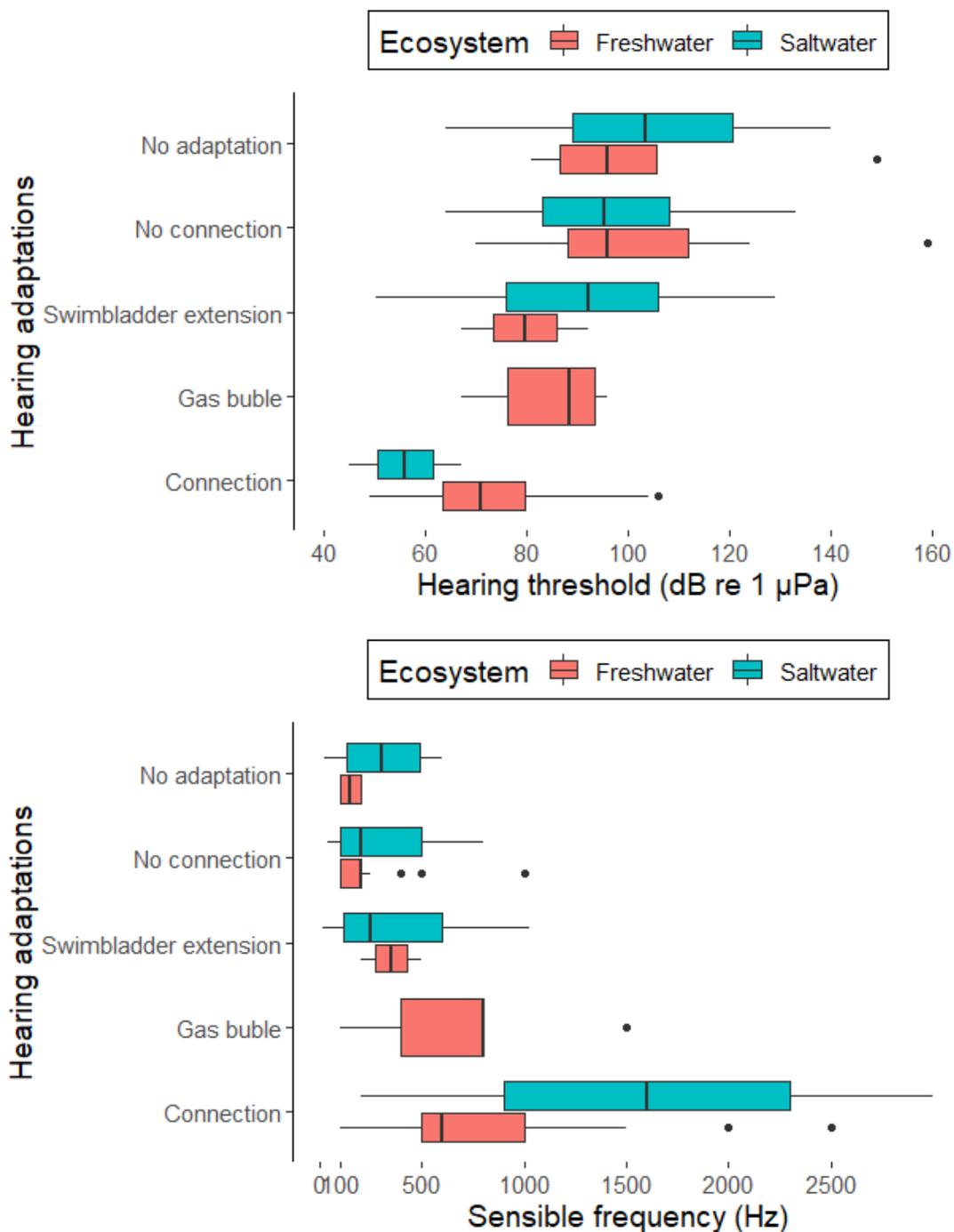


Figure 2.4 Seuils auditifs (angl. : *hearing threshold*) et fréquences sensibles (angl. : *sensitive frequency*) de 185 poissons (Tirée de Ladich et Fay, 2013, Mann et al., 2007 et Nedwell et al., 2004), dont 156 espèces différentes, en fonction de leur milieu de vie et selon 5 groupes d'adaptation auditive (Section 2.3 Matériel et méthodes).

2.4.2 Portrait sonore du paysage subaquatique

Les fréquences dominantes des séquences audio couvrent la plage de fréquence 100-2000 Hz. Les événements anthropiques recensés augmentent le niveau sonore et sont dominés par des fréquences plus élevées que les sons ambiants subaquatiques. La plupart des sons ambiants dominant dans les basses fréquences avec une médiane de 111 Hz (Figure 2.5e), tandis que les fréquences dominantes des sons anthropiques se situent autour de 370 Hz. Les événements anthropiques ajoutent en moyenne 18 dB au niveau sonore ambiant (Figure 2.5b). Les max SPL les plus élevés dans le jeu de données sont de 152 dB pour les sons anthropiques et de 111 dB pour les sons ambiants.

Les niveaux sonores max SPL des événements acoustiques anthropiques en lacs et rivières se situent majoritairement au-dessus des seuils d'audition des poissons d'eau douce. En effet, les seuils auditifs de 75 % des espèces répertoriées sont inférieurs aux max SPL des événements anthropiques subaquatiques (Figure 2.5a). Par ailleurs, la distribution des fréquences dominantes des sons anthropiques se superpose entièrement à celle des fréquences sensibles des poissons d'eau douce (Figure 2.5d). Par conséquent, la grande majorité des espèces sont susceptibles de détecter les événements anthropiques qui ont été recensés lors des inventaires du portrait sonore.

L'expérience a permis de recréer des paysages acoustiques subaquatiques d'enrichissement sonore au lac Saint-Pierre. Les valeurs d'intensité sonore et de fréquence dominante dans l'expérience étaient comparables à celles obtenues lors du portrait des paysages acoustiques en lacs et rivières (Figures 2.5c, 2.5f). Les signatures spectrales dans les deux traitements étaient bien contrastées (Annexe D). L'enrichissement en sons par le moteur augmentait le SPL de 22 dB en moyenne au-dessus des valeurs ambiantes. Les basses fréquences caractérisaient les sons ambiants du lac Saint-Pierre avec une médiane des fréquences dominantes à 110 Hz, tandis que les sons du moteur généraient des signaux acoustiques de plus hautes fréquences avec une valeur médiane à 956 Hz.

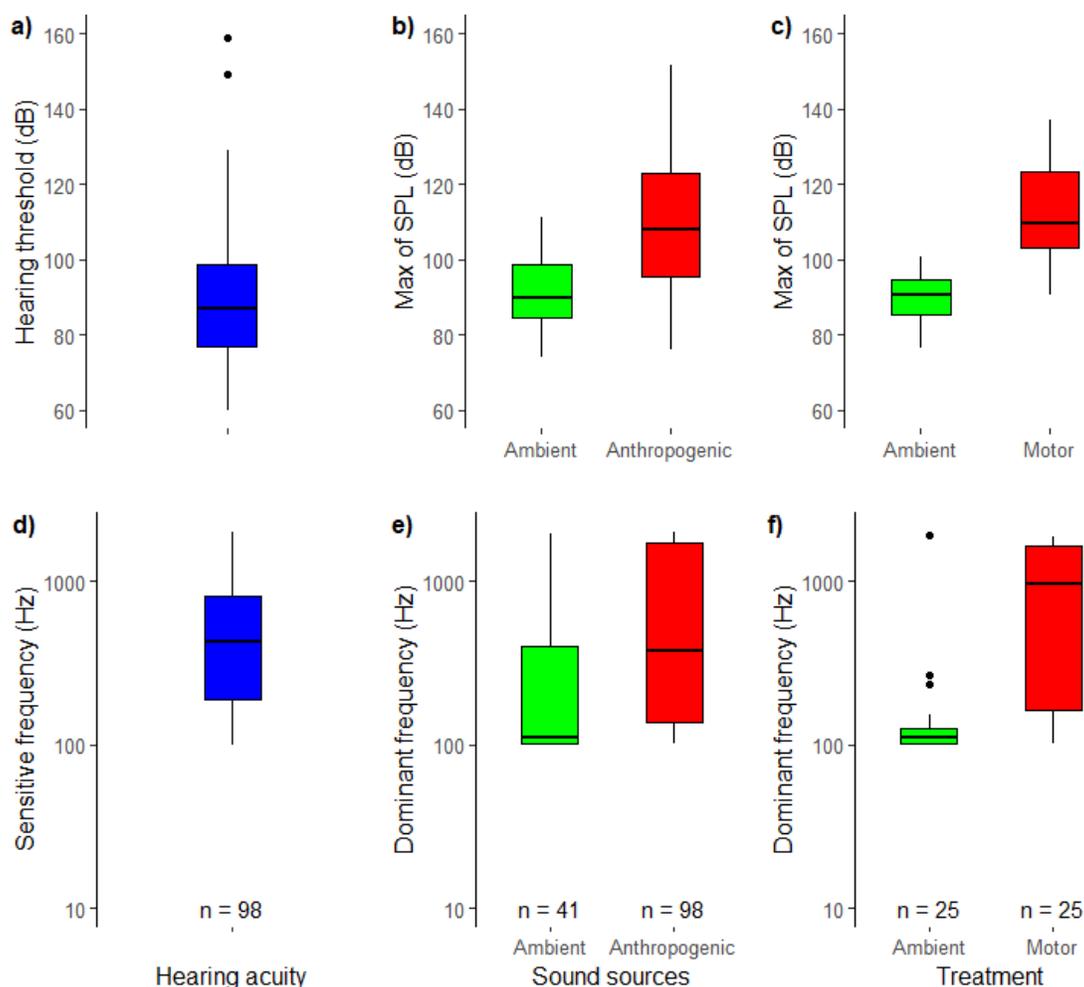


Figure 2.5 Diagrammes à moustaches de l'acuité auditive (angl. : *hearing acuity*) des poissons d'eau douce, de sources sonores et des traitements de l'expérience d'évitement : le niveau de pression acoustique (Max of SPL) minimal détectable (a) et de la fréquence sensible (angl. : *sensitive frequency*) des seuils auditifs de poisson d'eau douce (d), de la pression acoustique maximale (b) et de la fréquence dominante (angl. : *dominant frequency*) (e) en fonction des sources de sons relevées dans les enregistrements du paysage acoustique subaquatique de 2019-2020, de la pression acoustique maximale (c) et de la fréquence dominante (f) dans les traitements sonores de l'expérience d'évitement. Les seuils auditifs sont tirés de Nedwell et al. (2004) et Ladich et Fay (2013).

2.4.3 Expérience d'enrichissement sonore

Au total, 26 272 poissons, appartenant à 30 espèces et à trois groupes d'adaptation auditive, ont été capturés. Les groupes sans adaptation et sans connexion ont été fusionnés et renommés « sans adaptation ». Seul le groupe « bulle d'air » n'était pas représenté en raison de l'absence d'espèces de poissons avec cette spécialisation auditive au Québec. De ces prises,

19 235 poissons avaient une connexion entre l'oreille interne et la vessie natatoire (regroupant 15 espèces), 7 012 n'avaient pas d'adaptation particulière (regroupant 14 espèces) et 25 possédaient une extension de la vessie natatoire vers l'oreille interne (une seule espèce).

L'analyse Hmsc montre que 14 des 16 espèces de poissons avec une adaptation auditive (connexion ou extension de la vessie natatoire) avaient des coefficients de pente négatifs à l'enrichissement sonore, indiquant un évitement des sons du moteur (Figure 2.6). Parmi celles-ci, six espèces incluant quatre du genre *Notropis* sous l'ordre des Cypriniformes avaient des coefficients, dont l'intervalle de crédibilité exclue zéro : *Notropis hudsonius*, *Ameiurus nebulosus*, *Alosa pseudoharengus*, *Notropis volucellus*, *Notropis bifrenatus*, *Notropis atherinoides*. Les trois espèces de la famille des Catostomidae sous l'ordre des Cypriniformes (*Moxostoma anisurum*, *Maxostoma macrolepidotum* et *Catostomus commersonii*) montraient également des signes d'évitement. En particulier, l'évitement était évident chez le chevalier blanc, mais le faible nombre de captures faisait augmenter l'intervalle de crédibilité. La barbotte brune (*Ameiurus nebulosus*), seule représentante de l'ordre des Siluriformes, montrait aussi un évitement marqué des sons du moteur. Deux espèces de l'ordre des Cypriniformes, *Hybognathus regius* et *Notemigonus crysoleucas*, démontraient des signes d'attraction à l'enrichissement sonore, mais avec des coefficients de pente faiblement positifs. L'analyse menée sur les 16 espèces de poissons présentant une adaptation auditive montrait une réponse d'évitement (Figure 2.7).

Les espèces sans adaptation auditive montrent des coefficients associés à l'enrichissement sonore qui se répartissaient de part et d'autre du zéro; cinq espèces avaient des valeurs négatives et neuf espèces avaient des valeurs positives. Parmi celles-ci, les espèces d'intérêt sportif au lac Saint-Pierre comme le grand brochet (*Esox lucius*), la perchaude (*Perca flavescens*) ou l'achigan (genre *Micropterus*) étaient davantage capturées dans les filets en présence d'un enrichissement sonore. Pour le doré jaune (*Sander vitreus*), une légère tendance à l'évitement était détectée. L'intervalle de crédibilité autour des coefficients croisait néanmoins zéro pour toutes les espèces sans adaptation auditive, à l'exception d'un effet d'évitement aux sons du moteur détecté chez le crapet-soleil (*Lepomis gibbosus*). Bien que l'intervalle de crédibilité englobe le zéro, l'autre espèce de crapet recensée (*Ambloplites rupestris* ou crapet de roche) montrait des signes d'attraction.

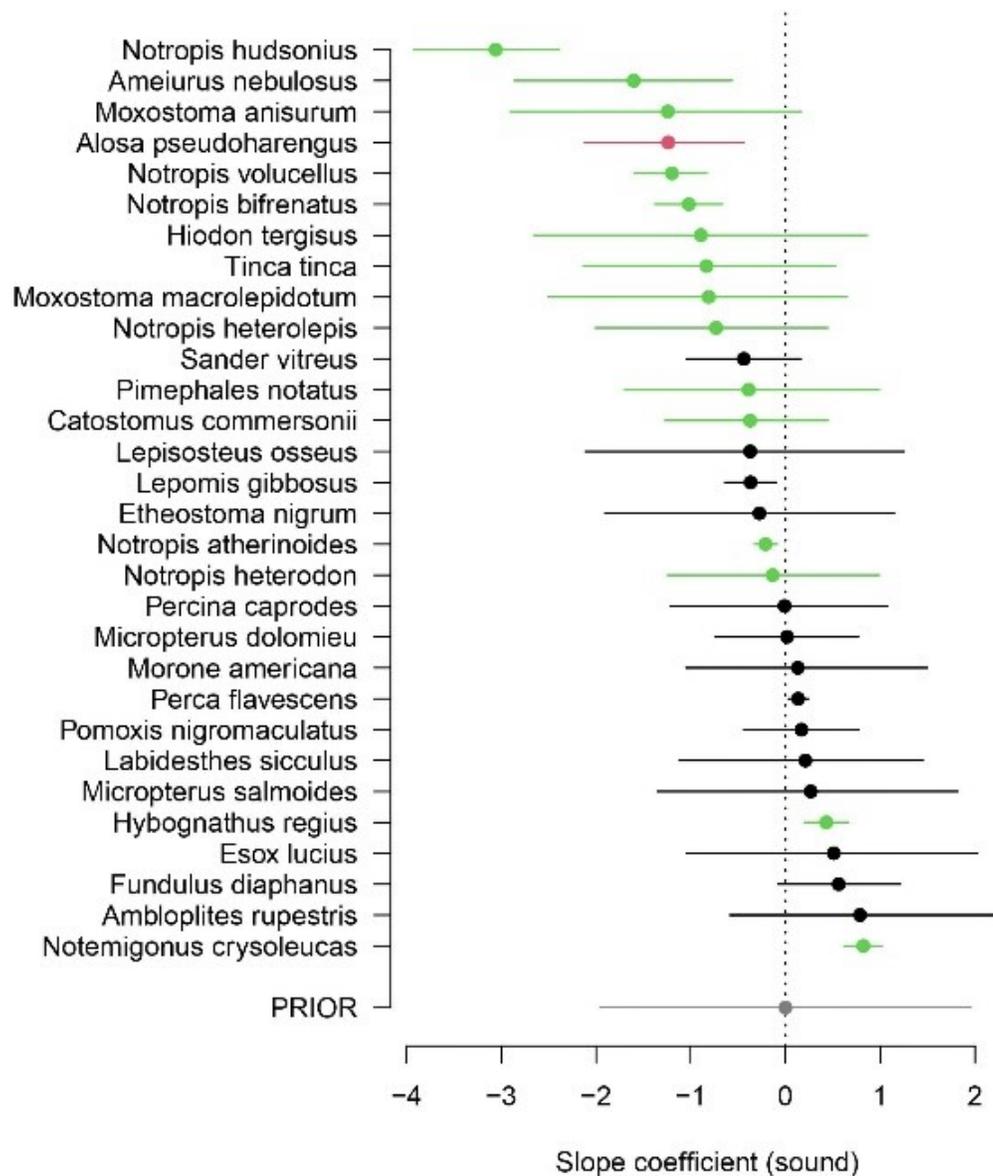


Figure 2.6 Synthèse de la distribution a posteriori du coefficient de régression (angl. : *slope coefficient*) associée à la réponse au bruit du traitement expérimental pour les 30 espèces étudiées (moyennes et intervalles de crédibilité à 95 %).

Les couleurs se réfèrent aux espèces sans adaptation auditive particulière (noir), aux espèces avec une connexion entre l'oreille interne et la vessie natatoire (vert) et à une seule espèce avec une extension de la vessie natatoire jusqu'à l'oreille interne (rouge). La distribution a priori de tous les coefficients est également indiquée (en gris).

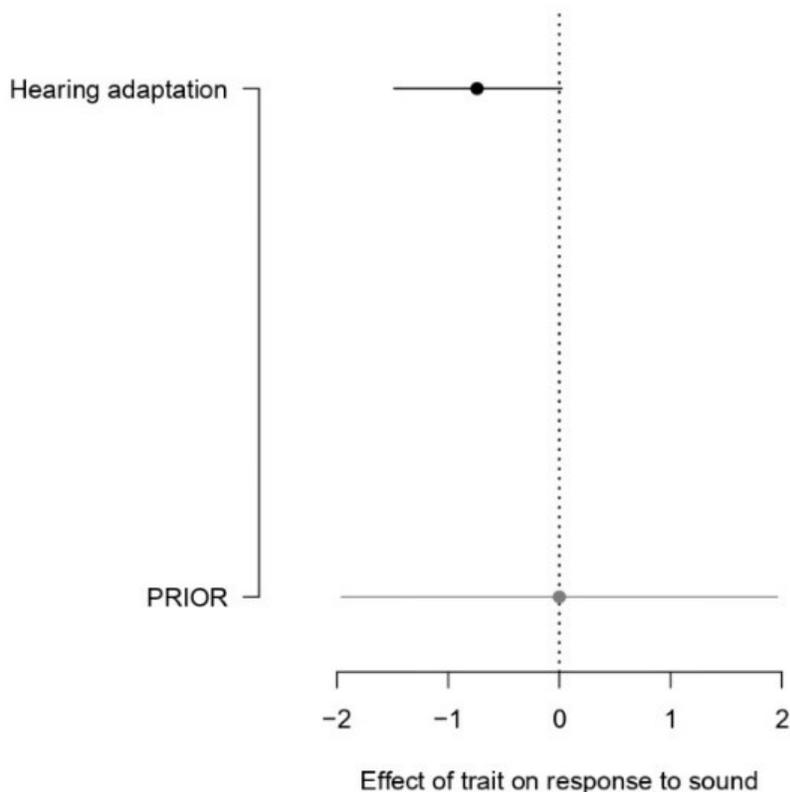


Figure 2.7 Synthèse de la distribution a posteriori du coefficient de régression associé à l'effet de l'adaptation auditive sur la réponse au bruit (angl. : *effect of trait on response to sound*) du traitement expérimental (moyenne et intervalle de crédibilité à 95 %). La distribution a priori (angl. : *prior*) est également représentée (en gris).

2.5 Discussion

L'objectif général de l'étude était d'évaluer le comportement d'évitement des poissons d'eau douce au son anthropique d'une embarcation motorisée en milieu naturel et à l'échelle d'une communauté d'espèces. Les résultats obtenus viennent appuyer l'hypothèse que le comportement d'évitement est plus fréquent chez les espèces qui possèdent une connexion ou un rapprochement entre la vessie natatoire et l'oreille interne.

2.5.1 Synthèse de l'acuité auditive et portrait sonore du paysage subaquatique

La présence d'adaptations auditives, telles que l'appareil de Weber ou l'extension de la vessie natatoire vers l'oreille interne, abaisse le seuil auditif des poissons et augmente la fréquence sensible d'audition. D'un point de vue évolutif, ces adaptations seraient

particulièrement utiles à l'audition dans les milieux d'eau douce (Natakani et al., 2011; Kunc et al., 2016). Par ailleurs, la propagation des basses fréquences en eau douce est fortement limitée par la fréquence de coupure (angl. : *Cutoff frequency*), qui correspond au seuil au-dessous duquel le son ne se propage pas dans l'eau. Par exemple, la fréquence de coupure dans une colonne d'eau de 1m au-dessus d'un substrat rocheux se situe autour de 400 Hz (Kacem et al., 2020). Lors de nos déploiements, les pics d'intensité sonore dans les fréquences inférieures à 100 Hz sont dû à la friction d'écoulement de l'eau sur l'hydrophone (angl. : *flow noise*) ou encore au bruit généré par l'équipement (angl. : *self noise*). C'est pour cette raison que cette plage de fréquences n'a pas été conservée lors des analyses. Dans les environnements peu profonds, comme les lacs et rivières, l'abaissement du seuil auditif combiné à l'augmentation de la fréquence sensible d'audition offrirait donc un avantage évolutif pour la détection des sons.

La synthèse des audiogrammes réalisée ici illustre la grande variabilité des seuils auditifs (de 60 à 130 dB) et de fréquences sensibles (de 100 à 2000 Hz) chez les poissons. L'enregistrement d'évènements acoustiques sous différentes conditions révèle que les seuils auditifs d'une majorité d'espèces de poissons en eau douce se situent à des niveaux sonores max SPL similaires aux sons ambiants. Ces résultats suggèrent que les poissons détectent le fond sonore ambiant, mais que celui-ci constitue un environnement relativement « calme » pour une majorité d'espèces. L'hypothèse des contraintes éco-acoustiques (angl. : *Ecoacoustical constraints hypothesis*) stipule que les seuils acoustiques des poissons ont co-évolués avec les conditions acoustiques des plans d'eau (Ladich 2013). Cette hypothèse propose que les seuils auditifs des espèces soient les plus bas possibles, traduisant ainsi une meilleure acuité auditive, sans être masqués par le fond sonore ambiant. Par exemple, une espèce adaptée aux eaux turbulentes dont le niveau sonore est élevé ne bénéficierait pas d'un seuil auditif très bas. Une analyse exploratoire de l'hypothèse des contraintes éco-acoustiques a été réalisée par Ladich (2013). Il a trouvé que la présence ou l'absence d'adaptations auditives appuyait le principe que les espèces avec des seuils auditifs plus bas vivaient principalement dans des eaux calmes. L'hypothèse est encore peu étudiée et mériterait qu'on s'y attarde plus en détail.

L'expérience au lac Saint-Pierre a permis de recréer des conditions acoustiques comparables à celles révélées lors du portrait sonore des paysages subaquatiques.

Les caractéristiques sonores de l'expérience (intensités et fréquences sonores) étaient également semblables à ce que d'autres études ont montré (Dyndo et al., 2015; Chion et al., 2017; Putland et Mensinger, 2020). Les événements acoustiques associés aux moteurs, activités de pêche, effets de vagues sur les structures physiques, ainsi qu'à la pose et l'entretien d'infrastructures génèrent, en moyenne, une augmentation du fond sonore de 18-22 dB au-dessus des valeurs ambiantes. Il importe de souligner que le portrait sonore associé aux sons anthropiques de la présente étude ne reflète aucunement les caractéristiques des sons à la source. Ce portrait correspond plutôt aux événements acoustiques auxquels les poissons des lacs et rivières sont couramment exposés en présence d'activités de nature anthropique. À titre comparatif, les limites d'exposition à la pollution sonore correspondent à une augmentation supérieure à 100 dB au-dessus des valeurs ambiantes pour les risques de mortalité et de blessure chez les poissons (Popper et Hawkins; 2019). La présente étude suggère que les comportements d'évitement sont présents chez plusieurs espèces de poissons, même à de faibles valeurs d'exposition.

2.5.2 Expérience d'enrichissement sonore

L'intégration des catégories d'adaptation auditive a permis de mieux comprendre l'impact du son sur le comportement des poissons en milieu naturel. Les analyses statistiques montrent qu'une forte majorité des espèces avec une spécialisation auditive (c.-à-d., appareil de Weber ou extension de la vessie natatoire) ont des coefficients de pente négatifs à l'enrichissement sonore, ce qui indique un évitement des sons du moteur. En particulier, les six espèces du genre *Notropis* (Ordre des Cypriniformes; famille des Cyprinidae) ont montré un évitement et quatre d'entre elles ont des coefficients de pente dont l'intervalle de crédibilité ne chevauche pas zéro. Parmi les 30 espèces évaluées dans la présente étude, *Notropis hudsonius* était d'ailleurs l'espèce avec le plus fort coefficient d'évitement à l'enrichissement sonore. Une expérience récente de réécoute des sons de moteur en milieu naturel a également révélé une forte réponse d'évitement chez *Notropis hudsonius* (Pieniazek et al., 2020). Cependant, deux espèces de la famille des Cyprinidae (*Hybognathus regius*, *Notemigonus crysoleucas*) ont plutôt montré des signes d'attraction à l'enrichissement sonore dans cette même étude. D'autres conditions que la présence de l'appareil de Weber sont donc nécessaires afin que se manifeste le comportement d'évitement. Les espèces du genre *Notropis* ont été peu étudiées, tant en termes d'audition que

de vocalisation. En particulier, la présence de dents pharyngiennes pourrait être un mécanisme impliqué dans l'évolution d'une communication par le son chez certaines espèces de ce groupe (Parmentier et al., 2016).

Deux autres espèces étaient associées à des coefficients de pente qui suggèrent un évitement des sons de moteur et dont l'intervalle de crédibilité ne chevauche pas zéro : la barbotte brune (*Ameiurus nebulosus*) et le gaspareau (*Alosa pseudoharengus*). Par ailleurs, les trois espèces de la famille des Catostomidae (*Maxostoma anisurum*, *Maxostoma macrolepidotum* et *Catostomus commersonii*), sous l'ordre des Cypriniformes, ont montré des tendances d'évitement aux sons de moteur, même si les intervalles des coefficients de pente chevauchaient zéro. La barbotte brune était la seule espèce de l'ordre des Siluriformes dans le jeu de données, alors que le gaspareau était le seul représentant de l'ordre des Clupeiformes. Ces deux ordres sont phylogéniquement reliés aux Cypriniformes et se retrouvent avec ce dernier dans le clade des Otocephala, qui regroupe les poissons possédant un lien mécanique entre la vessie natatoire et l'oreille interne. Les quatre autres ordres de poissons dans ce clade (Alepocephaliformes, Gonorynchiformes, Gymnotiformes, Characiformes) n'ont pas d'espèces présentes au Québec.

Les espèces de poissons sans adaptation auditive particulière n'ont montré aucune tendance générale à l'évitement dans l'expérience d'enrichissement sonore. Parmi celles-ci, certaines espèces étaient mieux représentées dans nos inventaires, dont la perchaude (*Perca flavescens*; n = 6496), le crapet-soleil (*Lepomis gibbosus*; n = 329), les dorés (genre *Sander*; n = 59) et les achigans (genre *Micropterus*; n = 25). Les audiogrammes issus de la synthèse de l'acuité auditive pour les groupes taxonomiques ci-haut relèvent des seuils auditifs au-dessus de 85 dB à des fréquences sensibles autour de 100 Hz. Ces valeurs sont d'ailleurs typiques des espèces sans connexion entre la vessie natatoire et l'oreille interne. Il est possible que les poissons appartenant à cette catégorie entendent peu ou pas les sons de moteurs lorsque celui-ci est au minimum de sa poussée. En effet, les médianes pour le niveau sonore (max SPL) et la fréquence dominante en présence d'enrichissement sonore à l'entrée des filets-trappes dans l'expérience étaient de 109 dB et 956 Hz, respectivement. Par conséquent, la majorité de l'énergie des sons de moteur se situait bien au-dessus de la fréquence sensible des poissons sans adaptation auditive. À cet égard, McCormick et al. (2019) ont montré en bassins de 40 L que

les signatures acoustiques de moteurs 2-temps ou 4-temps engendrent des effets différents au niveau de la réponse comportementale des poissons. La vaste gamme d'embarcations et de moteurs couramment utilisés au lac Saint-Pierre pourrait influencer la faune aquatique à différents degrés, indépendamment des adaptations auditives.

Des études s'appuyant sur des méthodes de suivi à distance, comme la télémétrie ou l'échosondage ont rapporté un comportement d'évitement chez les poissons lorsqu'un bateau motorisé est en approche (Vabø et al., 2002; Handegard et al., 2003; Jacobsen et al. 2014). Ces méthodes ciblent généralement une à deux espèces et les auteurs reconnaissent qu'il est parfois difficile de séparer les effets acoustiques des stimuli visuels (p. ex., bateau en approche, changement de la turbidité). Ces mêmes méthodes ont cependant l'avantage de travailler avec des sons de moteurs « réels » plutôt que des sons rejoués à travers un haut-parleur. Des auteurs ont également noté que l'effet du son sur le comportement des poissons s'estompe avec le temps, ce qui suggère un phénomène d'accoutumance (Harding et al., 2019; Nedelec et al., 2016). L'expérience d'enrichissement sonore décrite dans la présente étude a cherché à minimiser plusieurs de ces biais potentiels. D'abord, les poissons devaient nager activement vers l'entrée du filet-trappe, en direction de la source de son, avant d'être capturés. L'embarcation à moteur était située derrière le filet-trappe et ne pouvait pas être détectée visuellement. Ensuite, l'expérience a permis de capturer jusqu'à 30 espèces de poissons avec des adaptations auditives contrastées. Néanmoins, certaines espèces exotiques et réputées abondantes dans le littoral du lac Saint-Pierre, comme la carpe européenne, *Cyprinus carpio*, ou le gobie à taches noires, *Neogobius melanostomus*, n'ont pas été capturées, ce qui traduit un biais d'échantillonnage de la communauté de poissons. Enfin, l'expérience représente une situation de référence en termes d'exposition sonore. En effet, les sons produits étaient ceux d'un moteur au minimum de sa poussée. L'exposition sonore des poissons aux sons des moteurs au lac Saint-Pierre est souvent supérieure à celle de l'expérience. Ainsi, les poissons n'étaient pas naïfs à ce type de pollution sonore avant l'expérience.

La littérature en bioacoustique fait régulièrement référence aux deux mécanismes de détection des sons chez les poissons; la détection de l'onde de pression via la vibration d'une cavité d'air comme la vessie natatoire, et la détection de l'onde mécanique via le mouvement des otolithes en réponse à l'accélération des particules (Popper et al., 2019). On considère

généralement que les poissons avec une connexion entre la vessie natatoire et l'oreille interne peuvent percevoir les sons via les deux modes d'audition, contrairement aux poissons sans connexion (Radford et al., 2012). Ces différences pourraient expliquer en partie les seuils auditifs plus bas et les fréquences sensibles plus élevées chez les espèces avec une connexion. La propagation de l'onde sonore selon ces deux modes peut grandement différer près de la source de son et dépend notamment de la dimension de l'hélice, la longueur d'onde, la profondeur d'eau, ainsi que du type de substrat (voir Schellart et Popper, 1992; Popper et Hawkins, 2018). Ici, l'accélération des particules n'a pas été mesurée. Par conséquent, les niveaux max SPL rapportés dans la présente étude ne devraient pas être interprétés comme des seuils d'exposition à la pollution sonore. Nos résultats devront être corroborés dans d'autres milieux d'eau douce et sur d'autres espèces de poissons.

2.6 Conclusion

L'impact de la pollution sonore subaquatique est un enjeu de conservation grandissant, car la réponse d'évitement peut notamment entraîner une perte d'habitat. Par exemple, la réglementation provinciale concernant la pêche au Québec prévoit des zones d'exclusion lors de la période de reproduction du poisson. Le principe de précaution suggérerait de limiter la présence des bateaux à moteur sur ces zones pendant cette période clé de leur cycle de vie. Néanmoins, les résultats de deux synthèses récentes de la littérature révèlent que les sons d'origine anthropique n'entraînent pas systématiquement d'effets négatifs sur le comportement du poisson (Kunc et al., 2016; Cox et al., 2018). Une autre étude a catalogué les réponses comportementales des poissons exposés à la pollution sonore dans des écosystèmes d'eau douce (Mickle et Higgs, 2017). Les auteurs concluent que les évidences d'un évitement aux sons anthropiques sont encore fragmentaires et mitigées. La présente étude suggère qu'il est essentiel de considérer la présence d'adaptations acoustiques afin de mieux comprendre et prédire la réponse comportementale des poissons à la pollution sonore. D'autres traits sensoriels comme la capacité à communiquer acoustiquement, la position de la ligne latérale, ou les types de neuromastes (c.-à-d., type « superficiel » ou « canal ») pourraient s'avérer tout aussi importants. L'intégration des connaissances en physique acoustique, biologie et écologie des poissons s'avèrera essentielle à l'élaboration de bonnes pratiques de gestion des impacts de la pollution sonore subaquatique.

2.7 Références

- Akamatsu, T., Okumura, T., Novarini, N., Yan, H. Y. (2002). Empirical refinements applicable to the recording of fish sounds in small tanks. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 112(6), 3073-3082. <https://doi.org/10.1121/1.1515799>
- Amoser, S., Ladich, F. (2005). Are hearing sensitivities of freshwater fish adapted to the ambient noise in their habitats? *Journal of Experimental Biology*, 208(18), 3533-3542. <https://doi.org/10.1242/jeb.01809>
- Amoser, S. Ladich, F. (2010). Year-round variability of ambient noise in temperate freshwater habitats and its implications for fishes. *Aquat. Sci.* 72, 371-378. <https://doi.org/10.1007/s00027-010-0136-9>
- Benoit, J., R. Bergeron, J.-C. Bourgeois, S. Desjardins, J. Picard. (1987). Les habitats et la faune de la région du lac Saint-Pierre: synthèse des connaissances. Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche du Québec, Directions régionales de Montréal et de Trois-Rivières. ix+123P.
- Braun, C. B. (2015). Signals and noise in the octavolateralis systems: What is the impact of human activities on fish sensory function? *Integrative Zoology*, 10(1), 4-14. <https://doi.org/10.1111/1749-4877.12092>
- Brehmer, P., Sarré, A., Guennégan, Y., Guillard, J. (2019). Vessel Avoidance Response: A Complex Tradeoff Between Fish Multisensory Integration and Environmental Variables. *Reviews in Fisheries Science and Aquaculture*. Consulté à l'adresse <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/23308249.2019.1601157>
- Bruintjes, R., Radford, A. N. (2014). Chronic Playback of Boat Noise Does Not Impact Hatching Success or Post-Hatching Larval Growth and Survival in a Cichlid Fish. *PeerJ* 2 (25 September 2014): e594. <https://doi.org/10.7717/peerj.594>
- Chang, J., Rabosky, D. L., Smith, S. A., Alfaro, M. E. (2019). An R package and online resource for macroevolutionary studies using the ray-finned fish tree of life. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(7) 1118-1124. doi: 10.1111/2041-210x.13182
- Chion, C., Lagrois, D., Dupras, J., Turgeon, S., McQuinn, I. H., Michaud, R., ... Parrott, L. (2017). Underwater acoustic impacts of shipping management measures: Results from a social-ecological model of boat and whale movements in the St. Lawrence River Estuary (Canada). *Ecological Modelling*, 354, 72-87. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.03.014>

- 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/10.1111/gcb.14106>
- De la Chenelière, V., Brodeur, P., Mingelbier, M. (2014). Restauration des habitats du lac Saint-Pierre : un prérequis au rétablissement de la perchaude. *Le Naturaliste canadien*, 138(2), 50–61. <https://doi.org/10.7202/1025070ar>
- De la Chenelière, V., Paradis, Y., Richard, G., Lecompte, F., Mingelbier, M. (2015). Les poissons du chenal de navigation et des autres habitats profonds du fleuve Saint-Laurent. Direction de la faune aquatique, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 70 p.
- De Robertis, A., Handegard, N. O. (2013). Fish avoidance of research vessels and the efficacy of noise-reduced vessels: A review. *ICES Journal of Marine Science*, 70(1), 34-45. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fss155>
- Dyndo, M., Wiśniewska, D. M., Rojano-Doñate, L., Madsen, P. T. (2015). Harbour porpoises react to low levels of high frequency vessel noise. *Scientific Reports*, 5, 11083. <https://doi.org/10.1038/srep11083>
- Farcas, A., Thompson, P. M., Merchant, N. D. (2016). Underwater noise modelling for environmental impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 57, 114-122. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.11.012>
- Fewtrell, J. L., McCauley, R. D. (2012). Impact of air gun noise on the behaviour of marine fish and squid. *Marine Pollution Bulletin*, 64(5), 984-993. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.02.009>
- Francis, C. D., Barber, J. R. (2013). A framework for understanding noise impacts on wildlife: An urgent conservation priority. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(6), 305-313. <https://doi.org/10.1890/120183>
- Gage, S. H., Axel, A. C. (2014). Visualization of temporal change in soundscape power of a Michigan lake habitat over a 4-year period. *Ecological Informatics*, 21, 100-109. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2013.11.004>
- 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), 1-7. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13186-2>

- Gordon, T. A. C., Harding, H. R., Wong, K. E., Merchant, N. D., Meekan, M. G., McCormick, M. I., ... Simpson, S. D. (2018). Habitat degradation negatively affects auditory settlement behavior of coral reef fishes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(20), 5193-5198. <https://doi.org/10.1073/pnas.1719291115>
- Handegard, N. O., Michalsen, K., Tjøstheim, D. (2003). Avoidance behaviour in cod (*Gadus morhua*) to a bottom-trawling vessel. *Aquatic Living Resources*, 16(3), 265-270. [https://doi.org/10.1016/S0990-7440\(03\)00020-2](https://doi.org/10.1016/S0990-7440(03)00020-2)
- Harding, H. R., Gordon, T. A. C., Hsuan, R. E., Mackaness, A. C. E., Radford, A. N., Simpson, S. D. (2018). Fish in habitats with higher motorboat disturbance show reduced sensitivity to motorboat noise. *Biology Letters*, 14(10), 20180441. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2018.0441>
- Hawkins, A. D., Pembroke, A. E., Popper, A. N. (2015). Information gaps in understanding the effects of noise on fishes and invertebrates. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 25(1), 39-64. <https://doi.org/10.1007/s11160-014-9369-3>
- Hildebrand, J.A. (2009). Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Marine Ecology-Progress Series*. 395:5-20.
- Holles, S., Simpson, S. D., Lecchini, D., Radford, A. N. (2016). Playback Experiments for Noise Exposure. Dans Arthur N. Popper and A. Hawkins (Éd.), *The Effects of Noise on Aquatic Life II* (p. 461-466). https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2981-8_55
- Holt, D. E., Johnston, C. E. (2015). Traffic noise masks acoustic signals of freshwater stream fish. *Biological Conservation*, 187, 27-33. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.04.004>
- Ives, A. R., Helmus, M. R., 2011. Generalized linear mixed models for phylogenetic analyses of community structure. *Ecological Monographs*, 81(3): 511-525.
- Jacobsen, L., Baktoft, H., Jepsen, N., Aarestrup, K., Berg, S., Skov, C. (2014). Effect of boat noise and angling on lake fish behaviour. *Journal of Fish Biology*, 84(6), 1768-1780. <https://doi.org/10.1111/jfb.12395>
- 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>
- Kuehne, L. M., Padgham, B. L., Olden, J. D. (2013). The Soundscapes of Lakes across an Urbanization Gradient. *PLoS ONE*, 8(2), 1-10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0055661>

- Kunc, H. P., McLaughlin, K. E., Schmidt, R. (2016). Aquatic noise pollution: Implications for individuals, populations, and ecosystems. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283(1836), 20160839. <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.0839>
- Ladich, F., 2013. Diversity in hearing in fishes: ecoacoustical, communicative, and developmental constraints. In *Insights from comparative hearing research* (pp. 289-321). Springer, New York, NY.
- Ladich, F. (2014). Fish bioacoustics. *Current Opinion in Neurobiology*, 28, 121-127. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2014.06.013>
- Ladich, F., Fay, R. R. (2013). Auditory evoked potential audiometry in fish. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 23(3), 317-364. <https://doi.org/10.1007/s11160-012-9297-z>
- Ladich, F., Schulz-Mirbach, T. (2016). Diversity in Fish Auditory Systems: One of the Riddles of Sensory Biology. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 4. <https://doi.org/10.3389/fevo.2016.00028>
- Mann, D. A., Cott, P. A., Hanna, B. W., Popper, A. N. (2007). Hearing in eight species of northern Canadian freshwater fishes. *Journal of Fish Biology*, 70(1), 109-120. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2006.01279.x>
- Mann, D., Cott, P., Horne, B. (2009). Under-ice noise generated from diamond exploration in a Canadian sub-arctic lake and potential impacts on fishes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 126(5), 2215-2222. <https://doi.org/10.1121/1.3203865>
- McCormick, M. I., Fakan, E. P., Nedelec, S. L., Allan, B. J. M. (2019). Effects of boat noise on fish fast-start escape response depend on engine type. *Scientific Reports*, 9(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43099-5>
- Mcqueen, A., Suedel, B., Wilkens, J. (2019). Review of the Adverse Biological Effects of Dredging-induced Underwater Sounds.
- 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/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>

- Murchy, K. A., Cupp, A. R., Amberg, J. J., Vetter, B. J., Fredricks, K. T., Gaikowski, M. P., Mensinger, A. F. (2017). Potential implications of acoustic stimuli as a non-physical barrier to silver carp and bighead carp. *Fisheries Management and Ecology*, 24(3), 208-216. <https://doi.org/10.1111/fme.12220>
- Nakatani, M., Miya, M., Mabuchi, K., Saitoh, K., Nishida, M. (2011). Evolutionary history of Otophysi (Teleostei), a major clade of the modern freshwater fishes: Pangaean origin and Mesozoic radiation. *BMC Evolutionary Biology*, 11(1), 177. <https://doi.org/10.1186/1471-2148-11-177>
- Nedelec, S. L., Simpson, S. D., Morley, E., Nedelec, B., Radford, A. (2015). Impacts of Regular and Random Noise on the Behaviour, Growth and Development of Larval Atlantic Cod (*Gadus Morhua*). *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282, n° 1817: 20151943. <https://doi.org/10.1098/rspb.2015.1943>
- Nedelec, S., Mills, S., Lecchini, D., Simpson, S. (2016). Repeated exposure to noise increases tolerance in a coral reef fish. *Environmental Pollution*, 216, 428-436. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.05.058>
- Nedwell, J.; Edwards, B.; Turnpenny, A.; Gordon, J. (2004). Fish and Marine Mammal Audiograms: A summary of available information (Report No. 534R0214). Report by Subacoustech Ltd.
- Neo, Y. Y., Parie, L., Bakker, F., Snelderwaard, P., Tudorache, C., Schaaf, M., Slabbekoorn, H. (2015). Behavioral changes in response to sound exposure and no spatial avoidance of noisy conditions in captive zebrafish. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2015.00028>
- Ovaskainen, O., Abrego, N., 2020. Joint Species Distribution Modelling: with Applications in R. Cambridge University Press.
- Ovaskainen, O., Tikhonov, G., Norberg, A., Guillaume Blanchet, F., Duan, L., Dunson, D., Roslin, T. Abrego, N., 2017. How to make more out of community data? A conceptual framework and its implementation as models and software. *Ecology Letters*, 20(5): 561-576.
- Paradis, E., J. Claude, K. Strimmer. (2004). APE: Analyses of Phylogenetics and Evolution in R Language. *Bioinformatics* 20, n° 2: 289-90. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btg412>
- Parmentier, E., Diogo, R., Fine, M. (2017). Multiple exaptations leading to fish sound production. *Fish and Fisheries* 18. n° 5: 958-66. <https://doi.org/10.1111/faf.12217>

- Pearson, W. H., Skalski, J. R., Malme, C. I. (1992). Effects of Sounds from a Geophysical Survey Device on Behavior of Captive Rockfish (*Sebastes* spp.). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 49(7), 1343-1356. <https://doi.org/10.1139/f92-150>
- 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/10.1016/j.jembe.2010.02.012>
- Pieniasek, R. H., Mickle, M. F., Higgs D. M. (2020). Comparative Analysis of Noise Effects on Wild and Captive Freshwater Fish Behaviour. *Animal Behaviour* 168: 129-35. <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., ... 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. 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/10.1111/j.1095-8649.2009.02319.x>
- Popper, Arthur N., Hawkins, A. D. (2018). The importance of particle motion to fishes and invertebrates. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 143(1), 470-488. <https://doi.org/10.1121/1.5021594>
- 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, no 5 (2019): 692-713. <https://doi.org/10.1111/jfb.13948>
- Popper, A.N., Hawkins, A.D., Sand, O., Sisneros, J.A., 2019. Examining the hearing abilities of fishes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 146(2), pp. 948-955.
- Prideaux G. (2017). Technical Support Information to the CMS Family Guidelines on Environmental Impact Assessments for Marine Noise-generating Activities, CMS, Bonn.
- Proulx, R., Waldinger, J. Koper, N. (2019). Anthropogenic Landscape Changes and Their Impacts on Terrestrial and Freshwater Soundscapes. *Curr Landscape Ecol Rep* 4, 41-50. doi:10.1007/s40823-019-00038-4
- Putland, R.L., Mensinger, A. F. (2020). Exploring the soundscape of small freshwater lakes. *Ecological Informatics*, 55, 101018. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2019.101018>

- Radford, C. A., J. C. Montgomery, P. Caiger, D. M. Higgs. (2012). Pressure and Particle Motion Detection Thresholds in Fish: A Re-Examination of Salient Auditory Cues in Teleosts. *The Journal of Experimental Biology*, 215, no Pt 19: 3429-35. <https://doi.org/10.1242/jeb.073320>
- Richardson, W. John (1995). *Marine Mammals and Noise*. San Diego: Academic Press.
- 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*, n/a(n/a). <https://doi.org/10.1111/fwb.13077>
- Rogers, P. H., Cox, M. (1988). Underwater Sound as a Biological Stimulus. Dans J. Atema, R. R. Fay, A. N. Popper, and W. N. Tavolga (Éd.), *Sensory Biology of Aquatic Animals* (pp. 131-149). https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3714-3_5
- Rohatgi, A. (2021). WebPlotDigitizer. Version:4.5. <https://automeris.io/WebPlotDigitizer>
- Schellart, N. A. M., Popper, A. N. (1992). Functional Aspects of the Evolution of the Auditory System of Actinopterygian Fish. Dans D. B. Webster, A. N. Popper, & R. R. Fay (Éd.), *The Evolutionary Biology of Hearing* (p. 295-322). https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2784-7_20
- Shannon, G., McKenna, M. F., Angeloni, L. M., Crooks, K. R., Fristrup, K. M., Brown, E., ... Wittermyer, 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/10.1111/brv.12207>
- Simmonds, M., Dolman, S., Jasny, M., Parsons, E., Weilgart, L., Wright, A., Leaper, R. (2014). Marine Noise Pollution - Increasing Recognition But Need for More Practical Action. *Journal of Ocean Technology*. https://animalstudiesrepository.org/acwp_ehlm/9
- 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 and Evolution*, 25(7), 419-427. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.04.005>
- Stan Development Team (2022). RStan: the R interface to Stan. R package version 2.21.7, <https://mc-stan.org/>
- Tikhonov, G., Opedal Ø. H., Abrego, N., Lehtikoinen A, Jonge, M., Oksanen, J., Ovaskainen, O. (2020). Joint Species Distribution Modelling with the R -package HMSC. *Methods in Ecology and Evolution*. 442-47. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13345>

- Tonolla, D., Acuña, V., Lorang, M. S., Heutschi, K., Tockner, K. 2010. A field-based investigation to examine underwater soundscapes of five common river habitats. *Hydrological Processes*, 24, 3146-3156.
- Truax, B., Barrett, G. W. (2011). Soundscape in a context of acoustic and landscape ecology. *Landscape Ecology*, 26(9), 1201-1207. <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9644-9>
- UN, 2018. Nineteenth Meeting of the United Nations Open-Ended Informal Consultative Process on Oceans and the Law of the Sea: Anthropogenic Underwater Noise. 18-22 June 2018, New York
- Vabø, R., Olsen, K., Huse, I. (2002). The effect of vessel avoidance of wintering Norwegian spring spawning herring. *Fisheries Research*, 58(1), 59-77. [https://doi.org/10.1016/S0165-7836\(01\)00360-5](https://doi.org/10.1016/S0165-7836(01)00360-5)
- Veirs, S., Veirs, V., Wood, J. D. (2016). Ship noise extends to frequencies used for echolocation by endangered killer whales. *PeerJ*, 4, e1657. <https://doi.org/10.7717/peerj.1657>
- Voellmy, I. K., Purser, J., Simpson, S. D., Radford, A. N. (2014). Increased Noise Levels Have Different Impacts on the Anti-Predator Behaviour of Two Sympatric Fish Species. *PLoS ONE*, 9(7), e102946. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102946>
- Wheeland, L. J., Rose, G. A. (2015). Quantifying fish avoidance of small acoustic survey vessels in boreal lakes and reservoirs. *Ecology of Freshwater Fish*, 24(1), 67-76. <https://doi.org/10.1111/eff.12126>
- Whitfield, A. K., Becker, A. (2014). Impacts of recreational motorboats on fishes: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 83(1), 24-31. <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 and Aquaculture*, 28(4), pp. 459-477.
- Wysocki, L. E., Dittami, J. P., Ladich, F. (2006). Ship noise and cortisol secretion in European freshwater fishes. *Biological Conservation*, 128(4), 501-508. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.10.020>

CHAPITRE III

CONCLUSION GÉNÉRALE

3.1 Contextualisation

Notre compréhension de la dynamique sonore dans les écosystèmes d'eau douce demeure complexe et fragmentaire, tandis que les sources sonores demeurent diverses : bateaux de pêcheurs, plaisanciers, motomarines, navires marchands, activités portuaires, infrastructures routières, etc. Néanmoins, les bateaux à moteur sont omniprésents sur le territoire et représentent la principale menace sonore. Les sons ont ainsi le potentiel d'avoir des impacts comportementaux sur les poissons. L'utilisation du territoire par l'humain a modifié le paysage acoustique en y ajoutant des sources sonores additionnelles et en augmentant le niveau ambiant. Entre autres, on entend de plus en plus parler de la pollution sonore et des effets que cette dernière peut engendrer sur les écosystèmes. Moins d'attention a été accordée à l'impact des sons anthropiques en milieu aquatique d'eau douce, comparativement aux efforts déployés en milieu terrestre (Shannon et al., 2015; Proulx et al., 2019) et en milieu marin (Simmonds et al., 2014; Roy et Simard, 2015; Lesage et al., 1999; Chion et al., 2017). La croyance d'un monde subaquatique silencieux commence également à s'estomper et l'impact des sons anthropiques représente dorénavant un enjeu de conservation grandissant.

Il est connu que le son est un facteur important pour les poissons (Ladich et Fay, 2013; Ladich, 2014; Hawkins et al., 2015; Ladich et Schulz-Mirbach, 2016) et que ceux-ci ont développé une vaste gamme de sensibilités auditives (Amoser et Ladich, 2005; Slabbekoorn et al., 2010). Les deux tiers des espèces de poissons vivant en eau douce possèdent un appareil auditif spécialisé appelé l'organe de Weber (Natakani et al., 2011; Ladich et Schulz-Mirbach, 2016; Kunc et al., 2016). Sur cette prémisse, la part des sons attribués aux activités humaines n'est pas seulement susceptible d'engendrer une augmentation du niveau de pollution sonore dans les écosystèmes d'eau douce, elle pourrait également causer des changements comportementaux chez la faune présente.

Les sons anthropiques peuvent entraîner des répercussions sur les poissons sur plusieurs aspects : la reproduction, l'alimentation, la prédation, l'évitement, etc. (Mickle et Higgs, 2017; Cox et al., 2018). Pourtant, ceux-ci n'engendrent pas systématiquement un effet sur la réponse comportementale. La présente étude cherche donc à apporter de nouveaux intrants afin d'émettre des considérations et suggestions en matière de conservation.

Par conséquent, l'objectif de notre étude était d'évaluer le comportement d'évitement des poissons d'eau douce à un son anthropique prédominant en milieu naturel et à l'échelle d'une communauté de poissons. L'enrichissement sonore de l'expérience qui a été menée est comparé aux sons que l'on retrouve dans les écosystèmes d'eau douce et aux audiogrammes des espèces de poissons connues.

3.2 Principaux résultats

La présence d'une spécialisation auditive (appareil de Weber ou extension de la vessie natatoire) abaissait le seuil auditif des poissons et augmentait la fréquence sensible d'audition. Il y avait peu de différence entre les seuils auditifs des poissons d'eau douce et d'eau salée. Une grande variabilité dans les seuils auditifs était observée entre les groupes d'adaptation, au sein des groupes d'adaptation, mais également chez les individus d'une même espèce (Annexe E). Les sons anthropiques dans l'environnement augmentaient le niveau sonore ambiant et dominaient dans les fréquences sensibles d'audition des poissons. L'enregistrement d'évènements acoustiques sous différentes conditions révèle que les seuils auditifs d'une majorité d'espèces de poissons en eau douce se situaient à des niveaux de pression acoustique similaires aux sons ambiants.

L'expérience d'évitement qui a été conduite au lac Saint-Pierre a mené à la capture de 26 272 poissons de tailles variées (Annexe F). Les individus capturés variaient entre 15 et 550 millimètres. De ce nombre, 30 espèces et trois groupes d'adaptation auditive étaient représentés. L'analyse menée sur les captures de poisson montre qu'un son anthropique, comme celui d'une embarcation motorisée, engendrait de l'évitement chez la majorité des espèces possédant une adaptation auditive (connexion de la vessie natatoire avec l'oreille interne

et extension de la vessie natatoire). *Alosa pseudoharengus*, la seule représentante des espèces possédant une extension de la vessie natatoire vers l'oreille interne, a exprimé un évitement significatif. Quatorze (14) espèces de poissons sur seize (16) avec une adaptation auditive ont montré de l'évitement. En contrepartie, les espèces de poissons sans adaptation auditive particulière ne montraient aucune tendance générale à l'évitement. En effet, seulement 4 espèces de poissons sur 14 ont exprimé une tendance à l'évitement. Notre étude a soulevé que le comportement compensatoire serait donc associé principalement à la phylogénie.

3.3 Conclusion

L'approche expérimentale en milieu naturel au lac Saint-Pierre a permis d'évaluer le comportement d'évitement sur l'ensemble des espèces qui interagissent entre elles au sein de la communauté de poissons. Nos travaux ont montré que l'évitement des poissons est associé à la phylogénie. Cette étude-ci se démarque par le fait qu'elle ne se concentre pas uniquement sur une espèce ou sur l'association d'une espèce avec sa proie, mais bien sur l'ensemble des espèces présentes. Il a donc été démontré que les espèces qui possèdent une adaptation auditive ont tendance à éviter davantage les sons de moteur, car leur acuité auditive développée est sensible aux sons anthropiques retrouvés dans les écosystèmes d'eau douce. La portée de l'étude n'est pas seulement restreinte aux espèces qui ont été capturées, car des prédictions peuvent être généralisées avec précaution en fonction des groupes d'adaptation et/ou d'espèces apparentées.

Nous avons démontré ici l'évitement des poissons au son anthropique. Cette réponse comportementale est surtout associée à des conséquences plutôt négatives sur la structure de la communauté d'espèces. À cet égard, la tendance des dernières années dans le domaine de l'écologie acoustique est surtout de soulever les impacts nuisibles des sons anthropiques (Cox et al., 2018). Malgré tout, une modification anthropique du paysage sonore pourrait entraîner des effets jugés positifs comme une amélioration de la composition d'espèces dans un écosystème corallien dégradé (Gordon et al., 2019). De plus, la maîtrise du son sert actuellement les gestionnaires de la faune dans l'élaboration de barrières non-physiques afin de lutter aux déplacements des espèces exotiques envahissantes (Murchy et al., 2017). Il faut donc retenir que

les composantes sonores demeurent des variables ayant des implications notables et diverses sur les poissons d'eau salée et d'eau douce.

Selon nos résultats, dans un écosystème d'eau douce comme le lac Saint-Pierre, les poissons composent avec l'omniprésence du son anthropique. Néanmoins, un évitement est exprimé lorsque le son est localisé spatiotemporellement. Ce déplacement des individus n'est cependant pas systématique. Le phénomène d'accoutumance peut entrer en considération. Une autre hypothèse soulevée entre autres par Roca et al. (2020) est le refuge acoustique où des espèces de poissons tireraient avantage d'un milieu bruyant pour être à l'abri des prédateurs. Le comportement inverse exprimé par *Hybognathus regius* et *Notemigonus crysoleucas* pourrait être expliqué par cette théorie, d'autant plus que ces deux espèces possèdent une adaptation auditive. N'oublions pas que des faits anecdotiques témoignent que des sons anthropiques peuvent générer des impacts d'attraction chez certaines espèces de poissons (p. ex., des sons produits par des leurres de pêche à la ligne pour capturer le poisson ou encore des techniques ancestrales pour attirer les poissons dans des filets). De plus, il serait intéressant d'effectuer une expérience semblable dans des écosystèmes isolés (sauvages) qui ne sont pas soumis à des sons anthropiques. La tendance à l'évitement risque d'être accentuée, car les poissons ne sont pas accoutumés à des perturbations sonores anthropiques (Fleissner et al., 2022). Malheureusement, les plans d'eau isolés supportent, dans la majorité des cas, une diversité d'espèces plus faible. Les interactions interspécifiques sont ainsi moins évidentes. La même expérience pourrait également être menée de nuit afin de cibler une période différente d'activité des poissons et un moment où le paysage sonore est habituellement moins bruyant. Autrement, il pourrait s'avérer essentiel de comparer plusieurs habitats et/ou plusieurs moteurs de puissance différente (McCormick et al., 2019). De telles sortes, les caractéristiques sonores ainsi changées pourraient provoquer des comportements différents. Il faut toutefois inévitablement s'attendre à de la variabilité dans les réponses comportementales dû au son anthropique causée par la variation intraspécifique (Harding et al., 2019).

Truax et Barrett (2011) avaient mentionné que sans une compréhension fondamentale de la structure des sons dans les écosystèmes d'eau douce, de la proportion des stimuli auditifs que peuvent percevoir les poissons, les résultats tirés du domaine de l'écologie acoustique ne

peuvent pas produire de généralités ou de tendances fortes. En ajout à cette affirmation, l'ensemble des résultats obtenus dans cette étude révèle qu'il est essentiel de considérer en plus la phylogénie des espèces afin de mieux comprendre et prédire la réponse comportementale des poissons à la pollution sonore. En réponse au manque de connaissance sur les sons dans les milieux d'eau douce, il s'avèrerait souhaitable et réaliste d'instaurer un programme de suivi acoustique au sein des écosystèmes d'eau douce. Ce programme s'inscrirait dans le type de surveillance acoustique passive (SAP). Des stations fixes d'enregistrement pourraient être déployées afin d'alimenter une base de données sur les composantes sonores. Les informations recueillies serviraient à documenter spatialement et temporellement les habitats aquatiques, de jour comme de nuit. Des hydrophones pourraient être positionnés près du fond de l'eau, là où une grande majorité des poissons se maintiennent. Ultimement, il serait possible de s'en servir comme référence afin de guider la prise de décision des gestionnaires de la faune et pour la conservation des habitats telles que des aires protégées.

Ces travaux nous ont apporté une indication sur ce que le poisson est capable d'entendre et d'engendrer comme réponse d'évitement dans l'environnement ainsi que sur la contribution sonore des activités humaines dans les écosystèmes d'eau douce. Cette compréhension a posteriori de la structure des sons dans les écosystèmes d'eau douce et la capacité auditive des poissons nous a permis d'établir un lien entre l'évitement et la présence de spécialisations auditives chez les poissons. Des pronostics peuvent être émis sur la qualité sonore des habitats et sur les impacts anticipés du son sur les espèces de poissons. Comme mentionné précédemment, l'intégration additionnelle de connaissances en physique acoustique, biologie et écologie des poissons s'avèrerait essentielle à l'élaboration de bonnes pratiques en matière de gestion des impacts de la pollution sonore subaquatique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Akamatsu, T., Okumura, T., Novarini, N., Yan, H. Y. (2002). Empirical refinements applicable to the recording of fish sounds in small tanks. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 112(6), 3073-3082. <https://doi.org/10.1121/1.1515799>
- Amoser, S., Ladich, F. (2005). Are hearing sensitivities of freshwater fish adapted to the ambient noise in their habitats? *Journal of Experimental Biology*, 208(18), 3533-3542. <https://doi.org/10.1242/jeb.01809>
- Braun, C. B. (2015). Signals and noise in the octavolateralis systems: What is the impact of human activities on fish sensory function? *Integrative Zoology*, 10(1), 4-14. <https://doi.org/10.1111/1749-4877.12092>
- Braun, C. B., Grande, T. (2008). Evolution of Peripheral Mechanisms for the Enhancement of Sound Reception. Dans J. F. Webb, R. R. Fay, & A. N. Popper (Éd.), *Fish Bioacoustics: With 81 Illustrations* (pp. 99-144). https://doi.org/10.1007/978-0-387-73029-5_4
- Brehmer, P., Sarré, A., Guennégan, Y., Guillard, J. (2019). Vessel Avoidance Response: A Complex Tradeoff Between Fish Multisensory Integration and Environmental Variables. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*. Consulté à l'adresse <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/23308249.2019.1601157>
- Chion, C., Lagrois, D., Dupras, J., Turgeon, S., McQuinn, I. H., Michaud, R., ... Parrott, L. (2017). Underwater acoustic impacts of shipping management measures: Results from a social-ecological model of boat and whale movements in the St. Lawrence River Estuary (Canada). *Ecological Modelling*, 354, 72-87. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.03.014>
- Cox, K. D., Brennan, L. P., Dudas, S. E., Juanes, F. (2016). Assessing the effect of aquatic noise on fish behavior and physiology: A meta-analysis approach. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 27(1), 010024. <https://doi.org/10.1121/2.0000291>
- 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/10.1111/gcb.14106>
- De Robertis, A., Handegard, N. O. (2013). Fish avoidance of research vessels and the efficacy of noise-reduced vessels: A review. *ICES Journal of Marine Science*, 70(1), 34-45. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fss155>

- Dyndo, M., Wiśniewska, D. M., Rojano-Doñate, L., Madsen, P. T. (2015). Harbour porpoises react to low levels of high frequency vessel noise. *Scientific Reports*, 5, 11083. <https://doi.org/10.1038/srep11083>
- Fay, R. R., Popper, A. N. (2012). Fish hearing: New perspectives from two «senior» bioacousticians. *Brain, Behavior And Evolution*, 79(4), 215-217. <https://doi.org/10.1159/000338719>
- Fewtrell, J. L., McCauley, R. D. (2012). Impact of air gun noise on the behaviour of marine fish and squid. *Marine Pollution Bulletin*, 64(5), 984-993. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.02.009>
- Fleissner, E. R., Putland, R. L. Mensinger, A. F. (2022). The effect of boat sound on freshwater fish behavior in public (motorized) and wilderness (nonmotorized) lakes. *Environ Biol Fish* 105, 1065–1079. <https://doi.org/10.1007/s10641-022-01318-5>
- Gage, S. H., Axel, A. C. (2014). Visualization of temporal change in soundscape power of a Michigan lake habitat over a 4-year period. *Ecological Informatics*, 21, 100-109. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2013.11.004>
- Gordon, T. A. C., Harding, H. R., Wong, K. E., Merchant, N. D., Meekan, M. G., McCormick, M. I., ... Simpson, S. D. (2018). Habitat degradation negatively affects auditory settlement behavior of coral reef fishes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(20), 5193-5198. <https://doi.org/10.1073/pnas.1719291115>
- Gordon, T. A. C., Radford, A. N., Davidson, I. K. et al. (2019). Acoustic enrichment can enhance fish community development on degraded coral reef habitat. *Nat Commun* 10, 5414. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13186-2>
- Handegard, N. O., Michalsen, K., Tjøstheim, D. (2003). Avoidance behaviour in cod (*Gadus morhua*) to a bottom-trawling vessel. *Aquatic Living Resources*, 16(3), 265-270. [https://doi.org/10.1016/S0990-7440\(03\)00020-2](https://doi.org/10.1016/S0990-7440(03)00020-2)
- Harding, H. R., Gordon, T. A. C., Eastcott, E., Simpson, S. D., Radford, A. N. (2019). Causes and Consequences of Intraspecific Variation in Animal Responses to Anthropogenic Noise. *Behavioral Ecology* 30, no 6: 1501-11.
- Hawkins, A. D., Pembroke, A. E., Popper, A. N. (2015). Information gaps in understanding the effects of noise on fishes and invertebrates. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 25(1), 39-64. <https://doi.org/10.1007/s11160-014-9369-3>
- He, P. (Éd.). (2010). *Behavior of marine fishes*. Ames, Iowa Oxford: Wiley-Blackwell.

- Hildebrand, J. A. (2009). Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Marine Ecology-Progress Series*. 395:5-20.
- Holles, S., Simpson, S. D., Lecchini, D., Radford, A. N. (2016). Playback Experiments for Noise Exposure. Dans Arthur N. Popper & A. Hawkins (Éd.), *The Effects of Noise on Aquatic Life II* (p. 461-466). https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2981-8_55
- 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/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/10.1016/j.biocon.2015.04.004>
- Jacobsen, L., Baktoft, H., Jepsen, N., Aarestrup, K., Berg, S., Skov, C. (2014). Effect of boat noise and angling on lake fish behaviour. *Journal of Fish Biology*, 84(6), 1768-1780. <https://doi.org/10.1111/jfb.12395>
- Kastelein, R. A., Van Der Heul, S., Verboom, W., De Haan, D., Reijnders, P. (2008). Acoustic dose-response effects in marine fish. *Bioacoustics*, 17(1-3), 201-202. <https://doi.org/10.1080/09524622.2008.9753816>
- Kuehne, L. M., Padgham, B. L., Olden, J. D. (2013). The Soundscapes of Lakes across an Urbanization Gradient. *PLoS ONE*, 8(2), 1-10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0055661>
- Kunc, H. P., McLaughlin, K. E., Schmidt, R. (2016). Aquatic noise pollution: Implications for individuals, populations, and ecosystems. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283(1836), 20160839. <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.0839>
- Kuperman, W. A., Ingenito, F. (1977). Attenuation of the coherent component of sound propagating in shallow water with rough boundaries. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 61(5), 1178-1187. <https://doi.org/10.1121/1.381417>
- Ladich, F. (2014). Fish bioacoustics. *Current Opinion in Neurobiology*, 28, 121-127. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2014.06.013>
- Ladich, F., Fay, R. R. (2013). Auditory evoked potential audiometry in fish. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 23(3), 317-364. <https://doi.org/10.1007/s11160-012-9297-z>
- Ladich, F., Schulz-Mirbach, T. (2016). Diversity in Fish Auditory Systems: One of the Riddles of Sensory Biology. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 4. <https://doi.org/10.3389/fevo.2016.00028>

- 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>
- Lesage, V., Barrette, C., Kingsley, M. C. S., Sjare, B. (1999). The Effect of Vessel Noise on the Vocal Behavior of Belugas in the St. Lawrence River Estuary, Canada. *Marine Mammal Science*, 15(1), 65-84. <https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.1999.tb00782.x>
- Lovell, J. M., Findlay, M. M., Nedwell, J. R., Pegg, M. A. (2006). The hearing abilities of the silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) and bighead carp (*Aristichthys nobilis*). *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 143(3), 286-291. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2005.11.015>
- Lugli, M., Fine, M. L. (2007). Stream ambient noise, spectrum and propagation of sounds in the goby *Padogobius martensii*: Sound pressure and particle velocity. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 122(5), 2881-2892. <https://doi.org/10.1121/1.2783113>
- Mann, D. A., Cott, P. A., Hanna, B. W., Popper, A. N. (2007). Hearing in eight species of northern Canadian freshwater fishes. *Journal of Fish Biology*, 70(1), 109-120. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2006.01279.x>
- McCormick, M. I., Fakan, E. P., Nedelec, S. L., Allan, B. J. M. (2019). Effects of boat noise on fish fast-start escape response depend on engine type. *Scientific Reports*, 9(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43099-5>
- Mcqueen, A., Suedel, B., Wilkens, J. (2019). Review of the Adverse Biological Effects of Dredging-induced Underwater Sounds.
- 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., 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. <https://doi.org/10.7202/1036506ar>
- Morley, E. L., Gareth, J., Radford, A. N. (2014). The importance of invertebrates when considering the impacts of anthropogenic noise. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 281(1776), 20132683. <https://doi.org/10.1098/rspb.2013.2683>

- Murchy, K. A., Cupp, A. R., Amberg, J. J., Vetter, B. J., Fredricks, K. T., Gaikowski, M. P., Mensinger, A. F. (2017). Potential implications of acoustic stimuli as a non-physical barrier to silver carp and bighead carp. *Fisheries Management and Ecology*, 24(3), 208-216. <https://doi.org/10.1111/fme.12220>
- Nakatani, M., Miya, M., Mabuchi, K., Saitoh, K., Nishida, M. (2011). Evolutionary history of Otophysi (Teleostei), a major clade of the modern freshwater fishes: Pangaeon origin and Mesozoic radiation. *BMC Evolutionary Biology*, 11(1), 177. <https://doi.org/10.1186/1471-2148-11-177>
- National Marine Manufacturers Association Canada. (2012). "The Economic Impact of Recreational Boating in Canada." <https://nautismequebec.com/files/files/NMMA%20Boating%20Economic%20Impact%20Study.pdf>
- National Research Council (Éd.). (2004). *Ocean noise and marine mammals* (2. print). Washington, DC: National Acad. Press.
- Nedelec, S., Mills, S., Lecchini, D., Nedelec, B., Simpson, S., Radford, A. (2016). Repeated exposure to noise increases tolerance in a coral reef fish. *Environmental Pollution*, 216, 428-436. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.05.058>
- Neo, Y. Y., Parie, L., Bakker, F., Snelderwaard, P., Tudorache, C., Schaaf, M., Slabbekoorn, H. (2015). Behavioral changes in response to sound exposure and no spatial avoidance of noisy conditions in captive zebrafish. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2015.00028>
- Nystuen, J. A. (1986). Rainfall measurements using underwater ambient noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 79(4), 972-982. <https://doi.org/10.1121/1.393695>
- OSPAR. (2009). *Overview of the impacts of anthropogenic underwater sound in the marine environment*.
- Pearson, W. H., Skalski, J. R., Malme, C. I. (1992). Effects of Sounds from a Geophysical Survey Device on Behavior of Captive Rockfish (*Sebastes* spp.). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 49(7), 1343-1356. <https://doi.org/10.1139/f92-150>
- 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/10.1016/j.jembe.2010.02.012>

- Pijanowski, B. C., Villanueva-Rivera, L. J., Dumyahn, S. L., Farina, A., Krause, B. L., Napoletano, B. M., ... 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. 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/10.1111/j.1095-8649.2009.02319.x>
- Popper, A. N., Fay, R. R. (2011). Rethinking sound detection by fishes. *Hearing Research*, 273(1), 25-36. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2009.12.023>
- Popper, A. N., Hawkins, A. D. (2018). The importance of particle motion to fishes and invertebrates. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 143(1), 470-488. <https://doi.org/10.1121/1.5021594>
- 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/10.1111/jfb.13948>
- Prideaux G. (2017). Technical Support Information to the CMS Family Guidelines on Environmental Impact Assessments for Marine Noise-generating Activities, CMS, Bonn.
- Proulx, R., Waldinger, J. Koper, N. (2019). Anthropogenic Landscape Changes and Their Impacts on Terrestrial and Freshwater Soundscapes. *Curr Landscape Ecol Rep* 4, 41–50. doi:10.1007/s40823-019-00038-4
- Purser, J., Radford, A. N. (2011). Acoustic Noise Induces Attention Shifts and Reduces Foraging Performance in Three-Spined Sticklebacks (*Gasterosteus aculeatus*). *PLoS ONE*, 6(2), e17478. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0017478>
- Putland, R. L., Mensinger, A. F. (2020). Exploring the soundscape of small freshwater lakes. *Ecological Informatics*, 55, 101018. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2019.101018>
- Putland, R. L., Montgomery, J. C., Radford, C. A. (2018). Ecology of fish hearing. *Journal of Fish Biology*. doi:10.1111/jfb.13867FF
- Radford, A. N., Kerridge, E., Simpson, S. D. (2014). Acoustic communication in a noisy world: Can fish compete with anthropogenic noise? *Behavioral Ecology*, 25(5), 1022-1030. <https://doi.org/10.1093/beheco/aru029>
- Richard, J. D. (1968). Fish Attraction with Pulsed Low-Frequency Sound. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 25(7), 1441-1452. <https://doi.org/10.1139/f68-125>

- 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*, n/a(n/a). <https://doi.org/10.1111/fwb.13077>
- Rogers, P. H., Cox, M. (1988). Underwater Sound as a Biological Stimulus. Dans J. Atema, R. R. Fay, A. N. Popper, & W. N. Tavolga (Éd.), *Sensory Biology of Aquatic Animals* (p. 131-149). https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3714-3_5
- Roy, N., Simard, Y. (2015). Bruit ambiant et fréquentation de la région de Cacouna par le béluga du Saint-Laurent à l'été 2014 par monitoring acoustique continu. *Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat.* 3141: vi + 22 p.
- Schellart, N. A. M., Popper, A. N. (1992). Functional Aspects of the Evolution of the Auditory System of Actinopterygian Fish. Dans D. B. Webster, A. N. Popper, & R. R. Fay (Éd.), *The Evolutionary Biology of Hearing* (pp. 295-322). https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2784-7_20
- Shannon, G., McKenna, M. F., Angeloni, L. M., Crooks, K. R., Fristrup, K. M., Brown, E., ... 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/10.1111/brv.12207>
- Simmonds, M., Dolman, S., Jasny, M., Parsons, E., Weilgart, L., Wright, A., Leaper, R. (2014). Marine Noise Pollution - Increasing Recognition But Need for More Practical Action. *Journal of Ocean Technology*. Consulté à l'adresse https://animalstudiesrepository.org/acwp_ehlm/9
- Simpson, S. D., Purser, J., Radford, A. N. (2015). Anthropogenic noise compromises antipredator behaviour in European eels. *Global Change Biology*, 21(2), 586-593. <https://doi.org/10.1111/gcb.12685>
- 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/10.1016/j.tree.2010.04.005>
- Spiga, I., Aldred, N., Caldwell, G. S. (2017). Anthropogenic noise compromises the anti-predator behaviour of the European seabass, *Dicentrarchus labrax* (L.). *Marine Pollution Bulletin*, 122(1), 297-305. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.067>
- Stanley Jenni A., Radford Craig A., Jeffs Andrew G. (2012). Location, location, location: Finding a suitable home among the noise. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279(1742), 3622-3631. <https://doi.org/10.1098/rspb.2012.0697>

- Statistique Canada. (2011). Le transport maritime au Canada 2009. Société des traversiers du Québec. Rapport annuel de gestion 2010-2011. Bulletin économique du transport. Numéro 42. 18 p. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/54-205-x/2011000/tablesectlist-tableauxsect-fra.htm>
- Vabø, R., Olsen, K., Huse, I. (2002). The effect of vessel avoidance of wintering Norwegian spring spawning herring. *Fisheries Research*, 58(1), 59-77. [https://doi.org/10.1016/S0165-7836\(01\)00360-5](https://doi.org/10.1016/S0165-7836(01)00360-5)
- Veirs, S., Veirs, V., Wood, J. D. (2016). Ship noise extends to frequencies used for echolocation by endangered killer whales. *PeerJ*, 4, e1657. <https://doi.org/10.7717/peerj.1657>
- Voellmy, I. K., Purser, J., Simpson, S. D., Radford, A. N. (2014). Increased Noise Levels Have Different Impacts on the Anti-Predator Behaviour of Two Sympatric Fish Species. *PLoS ONE*, 9(7), e102946. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102946>
- Wenz G M (1962). Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources. *The Journal of the Acoustical Society of America*, December 1962, Volume 34, Issue 12, pp. 1936-1956.
- Wheeland, L. J., Rose, G. A. (2015). Quantifying fish avoidance of small acoustic survey vessels in boreal lakes and reservoirs. *Ecology of Freshwater Fish*, 24(1), 67-76. <https://doi.org/10.1111/eff.12126>
- Whitfield, A. K., Becker, A. (2014). Impacts of recreational motorboats on fishes: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 83(1), 24-31. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.03.055>
- Wolter, C., Arlinghaus, R. (2003). Navigation impacts on freshwater fish assemblages: The ecological relevance of swimming performance. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 13(1), 63-89. <https://doi.org/10.1023/A:1026350223459>
- Wysocki, L. E., Dittami, J. P., Ladich, F. (2006). Ship noise and cortisol secretion in European freshwater fishes. *Biological Conservation*, 128(4), 501-508. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.10.020>

ANNEXE A

LISTE DES ÉVÉNEMENTS ACOUSTIQUES ANTHROPIQUES ENREGISTRÉS (N = 98)

Événements acoustiques	Milieu	Max SPL	Fréq dom	Latitude	Longitude	Prof_hydro_m
Musique en surface	Lac	112	276	46,78175	-72,87646	1
Musique en surface	Lac	120	276	46,78175	-72,87646	0,1
Plage bondée	Lac	105	1731	46,76609	-72,91822	0,5
Marcher avec le pied lourd	Lac	114	126	46,762343	-72,99184	0,5
Marcher normalement	Lac	101	161	46,762343	-72,99184	0,5
Assis sur le quai à se mouiller les pieds à l'eau	Lac	96	1621	46,762343	-72,99184	0,5
Siffler	Lac	86	131	46,762343	-72,99184	0,5
Musique en surface	Lac	89	111	46,762343	-72,99184	0,5
Musique en surface	Lac	93	1831	46,762343	-72,99184	0,5
Musique en surface	Lac	86	116	46,762343	-72,99184	0,5
Musique en surface	Lac	99	586	46,762343	-72,99184	0,1
Musique en surface	Lac	99	736	46,762343	-72,99184	0,1
Musique en surface	Lac	96	106	46,762343	-72,99184	0,1
Ricochets de pierres	Lac	85	841	46,762343	-72,99184	0,5
Musique en surface	Lac	111	271	46,762343	-72,99184	0
Musique en surface	Lac	108	291	46,762343	-72,99184	0
Musique en surface	Lac	108	371	46,762343	-72,99184	0
7 personnes sur le quai, 2 rabaskas et 1 kayak	Lac	91	121	46,77746	-72,88696	0,2
Canot et kayak	Lac	102	1901	46,753852	-73,05475	0,5
Voiture qui circule sur un pont	Lac	79	111	46,753852	-73,05475	0,5
Canot	Lac	90	101	46,75775	-73,06879	1
5 kayaks	Lac	92	421	46,76152	-73,08661	1
Ponton ancré à deux endroits. Bateaux à plus de 300 m. 2 personnes en apné	Lac	95	1586	45,10784	-74,41387	1

Événements acoustiques	Milieu	Max SPL	Fréq dom	Latitude	Longitude	Prof_hydro_m
Voilier avec moteur à essence	Lac	105	101	45,10784	-74,41387	1
Feux d'artifice du GP3R	Fleuve	126	1991	46,33018	-72,52965	1
Feux d'artifice du GP3R	Fleuve	129	1941	46,33018	-72,52965	1
Pédalo à vitesse moyenne	Lac	122	151	47,032548	-71,42118	1
Pédalo à forte vitesse	Lac	125	181	47,032548	-71,42118	1
Marina avec une chaloupe en approche	Fleuve	106	1921	46,68125	-71,87777	1
Circulation de voitures sur un pont	Rivière	98	101	46,22542	-72,6226	1
Moteur 2 temps 2 forces à faible régime	Rivière	126	101	46,22759	-72,62382	
Moteur 2 temps 2 forces à plein régime	Rivière	152	141	46,22759	-72,62382	
À 200-300 m en amont d'un barrage hydroélectrique	Rivière	111	1976	46,448822	-72,74466	0,1
Pédalo à vitesse moyenne	Lac	120	361	46,63428	-72,59992	1
Moteur 150 forces au neutre	Rivière	145	1891	46,351668	-72,53165	1
2 motomarines	Rivière	116	1901	46,351668	-72,53165	1
1 ponton et 1 motomarine et 6 bateaux en action	Rivière	127	1866	46,351668	-72,53165	1
Bruit sous un pont	Rivière	118	1716	46,357791	-72,53715	1
Bateau moteur 115 forces à faible régime	Rivière	134	211	46,357791	-72,53715	1
Bruit sous le pont et motomarine	Rivière	122	1266	46,366943	-72,55743	1
Poisson-nageur	Fleuve	128	1256	46,333977	-72,51493	1
Leurre de surface Popper	Fleuve	102	1966	46,333977	-72,51493	1
Spinnerbait	Fleuve	89	136	46,333977	-72,51493	1
Leurre de surface grenouille	Fleuve	92	1726	46,333977	-72,51493	1
Poisson-nageur	Fleuve	93	1866	46,333977	-72,51493	1
Poisson-nageur hélice	Fleuve	98	1971	46,333977	-72,51493	1
Dandinette horizontale	Fleuve	93	106	46,333977	-72,51493	1
Buzzbait	Fleuve	102	1851	46,333977	-72,51493	1
Cuillère Dare devil	Fleuve	92	111	46,333977	-72,51493	1
Cuillère tournante	Fleuve	89	1696	46,333977	-72,51493	1

Événements acoustiques	Milieu	Max SPL	Fréq dom	Latitude	Longitude	Prof_hydro_m
Poisson-nageur à la dandinette	Fleuve	104	1956	46,333977	-72,51493	1
Vibrato Sébile	Fleuve	97	106	46,333977	-72,51493	1
Ancre qui gratte au fond	Rivière	115	1736	46,366943	-72,55743	1
Déplacement de personnes dans la chaloupe	Rivière	104	216	46,36648	-72,44856	1
Fracas avec une rame	Rivière	123	206	46,36648	-72,44856	1
Déplacement d'un bidon d'essence	Rivière	127	221	46,36648	-72,44856	1
Ramer	Rivière	102	281	46,36648	-72,44856	1
Parler	Rivière	95	176	46,36648	-72,44856	1
Parler à haute voix	Rivière	105	481	46,36648	-72,44856	1
Moteur 20 forces au neutre	Rivière	143	261	46,36648	-72,44856	1
Voitures qui circulent sur une route	Rivière	87	121	46,304215	-72,5329	1
Bateau marchand sortant d'un port	Fleuve	127	1581	46,31776	-72,54883	1
Plongeur à 1 m	Fleuve	114	381	45,14798	-74,35325	1
Plongeur à 10 m	Fleuve	108	411	45,14798	-74,35325	1
Plongeur à 5 m	Fleuve	110	371	45,14798	-74,35325	1
Bateau tirant une chambre d'air	Fleuve	93	1906	45,14798	-74,35325	1
Son ambiant avec bateau de plaisance dans le chenal	Fleuve	106	1821	46,272389	-72,61964	1
Pompe à eau d'un chalet qui fonctionne	Lac	76	136			
Haut-parleur submersible cargo volume 50		125	426			
Canot et kayak	Lac	110	1286			
Bruit de bateau vraiment fort au loin : avec moteur d'un voilier pas loin	Fleuve	126	236			
Bateau tirant une chambre d'air et ponton tirant un wakeboard	Fleuve	116	361			
Passage d'un gros bateau	Fleuve	93	131			
Passage d'un bateau	Fleuve	121	446			
Retirer une ancre	Fleuve	104	101			
Jeter une ancre	Fleuve	116	256			

Événements acoustiques	Milieu	Max SPL	Fréq dom	Latitude	Longitude	Prof_hydro_m
Aéroglesseur	Fleuve	100	121			
Coup de senne (engin de pêche)	Étang	89	101			
Effarouchement à 15 m avec 1 personne	Étang	87	111			
Effarouchement 20 m avec 2 personnes	Étang	86	101			
Voiture qui circule	Rivière	82	101			
Amont d'un barrage hydroélectrique	Rivière	144	161			
Amont d'un barrage hydroélectrique	Rivière	146	176			
Aval d'un barrage hydroélectrique	Rivière	112	121			
Aval d'un barrage hydroélectrique	Rivière	119	156			
2 motomarines	Rivière	119	1826			
1 ponton et 1 motomarine et 6 bateaux en action	Rivière	133	1001			
Bruit sous un pont	Rivière	118	1556			
Motomarine	Rivière	109	1806			
Bruit sous un pont	Rivière	101	106			
Moteur 20 forces qui ne veut pas démarrer	Rivière	105	1951			
Bateau marchand	Fleuve	126	1641			
Deux bateaux marchands	Fleuve	128	546			
Deux bateaux ancrés dont un avec les moteurs en marche	Fleuve	130	1101			
Bateau Cargo Volga	Fleuve	129	421			
Bateau dragueuse Ocean Traverse Nord	Fleuve	135	1706			
1 ponton, 1 motomarine et 6 bateaux déplacement	Rivière	140	1161			
1 ponton, 1 motomarine et 6 bateaux en déplacement	Rivière	139	1936			

Les enregistrements ont été effectués à l'aide d'un hydrophone pendant la période de juin à octobre 2019 dans plusieurs plans d'eau de la province de Québec, Canada. La durée des enregistrements variait entre 5 et 20 secondes. Pour chaque événement, nous avons récupéré l'intensité maximale (max SPL en dB re 1 uPa) et la fréquence dominante (Hz).

ANNEXE B

LISTE DES ÉVÉNEMENTS ACOUSTIQUES AMBIANTS ENREGISTRÉS (N = 41)

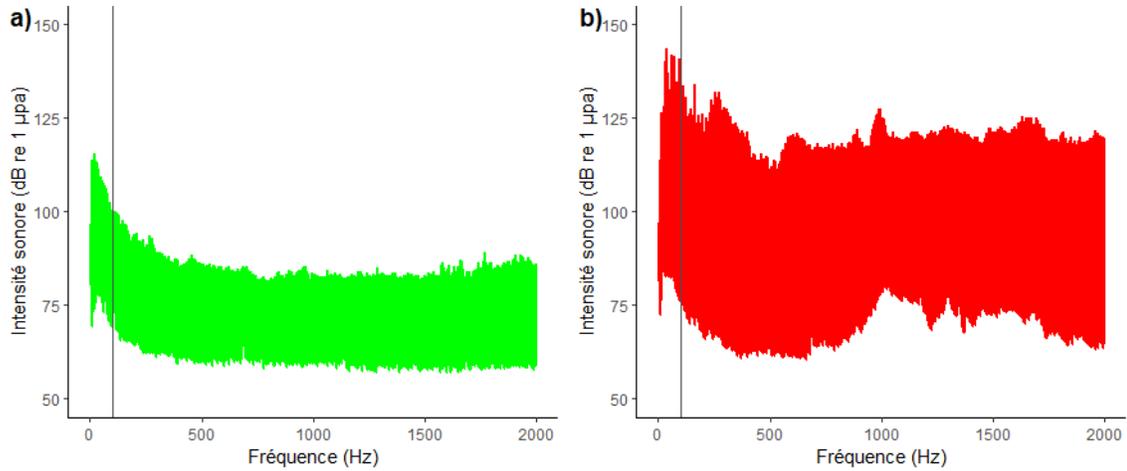
Événements acoustiques	Milieu	Max SPL	Fréq dom	Latitude	Longitude	Prof_hydro_m
Son ambiant	Lac	80	101	46,78175	-72,87646	1
Son ambiant	Lac	81	101	46,762343	-72,991835	0,5
Son ambiant	Lac	85	101	46,753852	-73,054752	0,5
Son ambiant	Lac	76	221	46,75775	-73,06879	1
Son ambiant	Lac	87	101	46,76152	-73,08661	1
Son ambiant	Lac	106	311	45,10784	-74,41387	1
Son ambiant	Lac	84	136	47,032548	-71,421177	1
Truites qui sautent en surface	Lac	87	101	47,032899	-71,421252	0,5
Son ambiant	Lac	94	101	47,032924	-71,421389	0,2
Son ambiant	Lac	93	101	47,033277	-71,42117	0,2
Petit bassin d'un ruisseau	Ruisseau	90	261	47,033513	-71,42092	0,1
Petit bassin d'un ruisseau	Ruisseau	99	566	47,033513	-71,42092	0,1
Ruisseau	Ruisseau	93	116	47,024815	-71,422377	0,1
Ruisseau	Ruisseau	99	176	47,024815	-71,422377	0,1
Ruisseau	Ruisseau	86	101	47,024815	-71,422377	0,1
Ruisseau sous un ponceau	Ruisseau	74	101	47,024815	-71,422377	0,1
Marina	Fleuve	92	1791	46,68125	-71,877766	1
Son ambiant	Rivière	82	126	46,24032	-72,64617	1
Son ambiant	Rivière	84	106	46,2334	-72,63754	1
Pluie modérée	Fleuve	110	761	46,278711	-72,596302	0,5
Son ambiant	Fleuve	85	111	46,333977	-72,51493	1
Son ambiant	Rivière	90	101	46,31236	-72,53892	1
Son ambiant	Fleuve	111	1856	46,34147	-72,537231	1
Son ambiant	Fleuve	100	396	45,14798	-74,35325	1
Son ambiant	Fleuve	102	106	46,33609	-72,51868	1

Événements acoustiques	Milieu	Max SPL	Fréq dom	Latitude	Longitude	Prof_hydro_m
Son ambiant	Fleuve	109	1851	46,336289	-72,517661	1
Son ambiant	Fleuve	105	1781	46,272389	-72,619635	1
Vagues venant s'éteindre sur un quai	Fleuve	103	1926	46,272532	-72,619285	1
Son ambiant		77	101			
Son ambiant		86	131			
Son ambiant		80	101			
Son ambiant		83	106			
Son ambiant		101	101			
Son ambiant		92	106			
Son ambiant		90	126			
Son ambiant		86	1266			
Son ambiant sous un pont		82	111			
Tonnerre	Fleuve	88	101			
Son ambiant		95	1881			
Son ambiant		91	1846			
Son ambiant		90	106			

Les enregistrements ont été effectués à l'aide d'un hydrophone pendant la période de juin à octobre 2019 dans plusieurs plans d'eau de la province de Québec, Canada. La durée des enregistrements variait entre 5 et 20 secondes. Pour chaque événement, nous avons récupéré l'intensité maximale (max SPL en dB re 1 uPa) et la fréquence dominante (Hz).

ANNEXE C

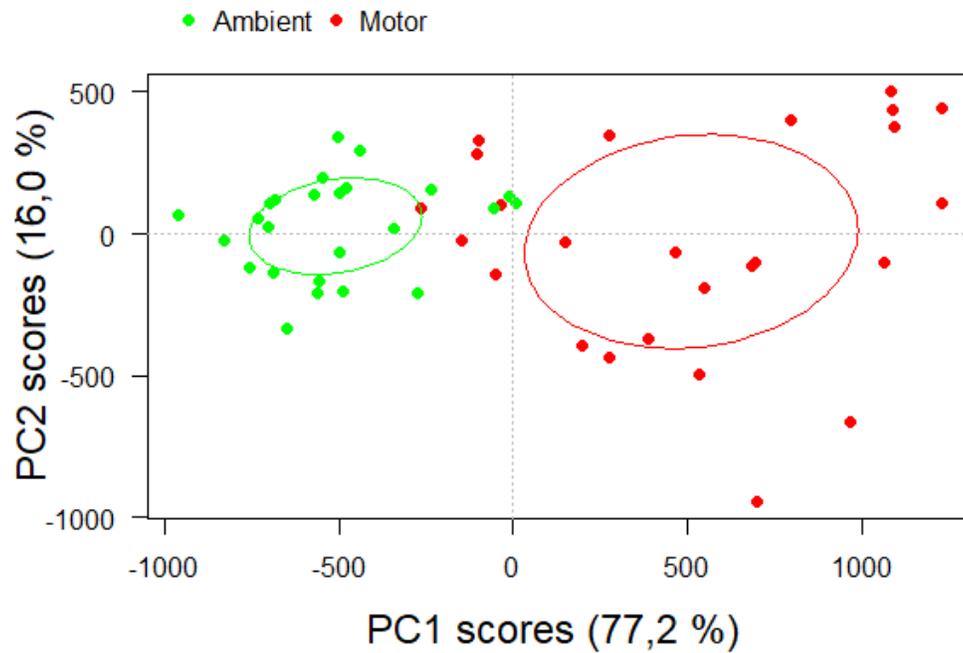
ÉTENDUE DES SPECTROGRAMMES DES ÉVÉNEMENTS ACOUSTIQUES A) AMBIANTS (N = 41) ET B) ANTHROPIQUES (N = 98) ENREGISTRÉS



Les enregistrements ont été effectués à l'aide d'un hydrophone pendant la période de juin à octobre 2019 dans plusieurs plans d'eau de la province de Québec, Canada. La durée des enregistrements variait entre 5 et 20 secondes. Pour chaque événement, nous avons récupéré l'intensité maximale (max SPL en dB re 1 uPa) et la fréquence dominante (Hz).

ANNEXE D

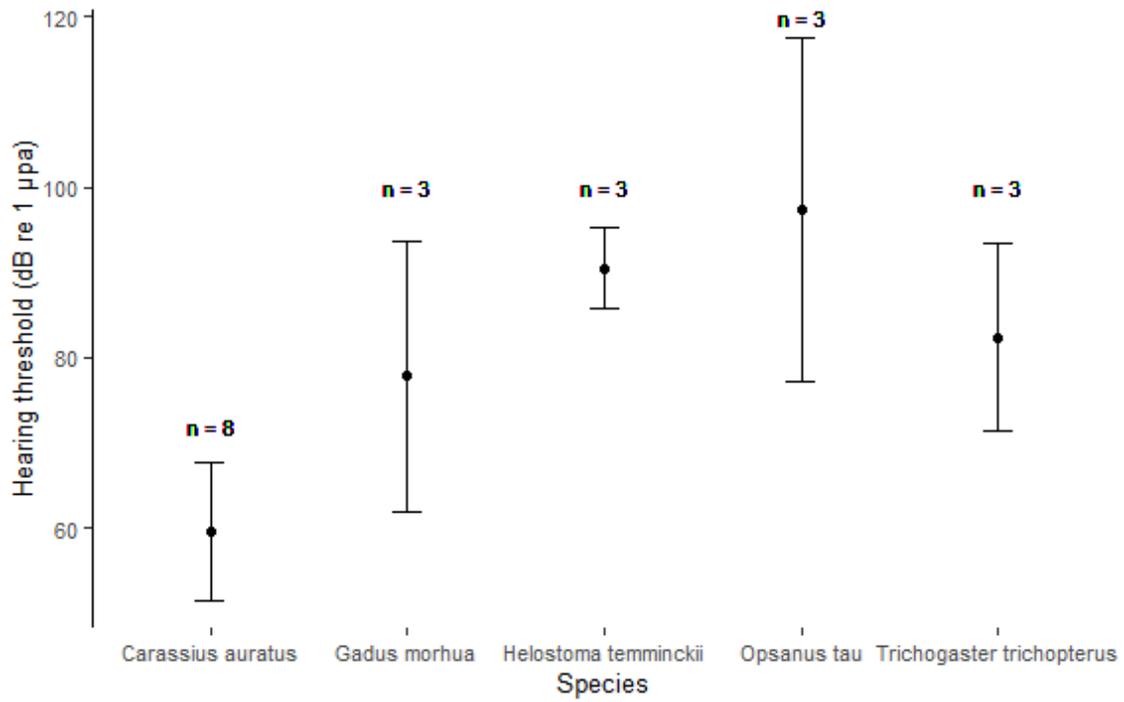
**ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES FONCTIONNELLE (FPCA) DES
ENREGISTREMENTS SONORES DES DEUX DIFFÉRENTS TRAITEMENTS
LORS DE L'EXPÉRIENCE D'ÉVITEMENT CONDUITE EN 2020
AU LAC SAINT-PIERRE, QUÉBEC, CANADA
(AMBIENT : N = 25, MOTOR : N = 25)**



ANNEXE E

VARIABILITÉ INTRASPÉCIFIQUE DES SEUILS AUDITIFS DE CINQ ESPÈCES DE POISSONS

(Tirés de Ladich et Fay, 2013, Mann et al., 2007 et Nedwell et al., 2004.)



ANNEXE F

DISTRIBUTION DES LONGUEURS MOYENNES DES POISSONS CAPTURÉS LORS DE L'EXPÉRIENCE D'ÉVITEMENT CONDUITE EN 2020 AU LAC SAINT-PIERRE, QUÉBEC, CANADA, TOUTES ESPÈCES CONFONDUES

