



Université du Québec
à Rimouski

**Effet du son des bateaux sur le comportement alimentaire des
larves de plie rouge (*Pseudopleuronectes americanus*)**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en Océanographie

en vue de l'obtention du grade de maître ès science

PAR

© **Gilberte Isabelle Marie Gendron**

Avril 2018

Composition du jury :

Richard Saint-Louis, président du jury, Université du Québec à Rimouski

Céline Audet, directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski

Réjean Tremblay, codirecteur de recherche, Université du Québec à Rimouski

Gesche Winkler, codirecteur de recherche, Université du Québec à Rimouski

Nadia Aubin-Horth, examinateur externe, Université Laval

Dépôt initial le 20 décembre 2017

Dépôt final le 11 avril 2018

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

‘Only those who risk going too far can possibly find out how far they can go’

T. S. Elliot

REMERCIEMENTS

J'aimerais tout d'abord exprimer ma gratitude envers ma directrice de recherche Céline Audet. Merci pour ce formidable encadrement, ta patience et ta disponibilité sans limites tout au long de ma maîtrise. Tu m'as beaucoup appris Céline surtout la rigueur dans le travail scientifique et pour cela je suis très reconnaissante. Mes sincères remerciements vont aussi à mes co-directeurs Réjean Tremblay et Gesche Winkler pour leurs conseils pertinents et leur encadrement tout au long de mon parcours. Merci aussi aux autres membres du jury d'évaluation, Nadia Aubin-Horth, évaluateur externe, et Richard Saint Louis, qui en a assumé la présidence.

Je tiens à remercier Renée Gagné pour son accompagnement tout au long de mon été à la station aquacole où j'ai mené mon expérience. Merci d'avoir toujours été présente, de transmettre ton savoir-faire et ton aide indispensable qui ont contribué au succès de mon expérience. Merci également à Aurélie Jolivet et Frédéric Olivier, pour leurs conseils et surtout leur grande disponibilité au cours de mon expérience, en particulier Aurélie pour l'installation du système de son.

Un grand merci à Maria, avec qui j'ai fait une super équipe depuis le début de la maîtrise. Je te remercie infiniment pour toute ton aide, ta disponibilité, ton encouragement et support constant. Ce fut un grand plaisir de travailler avec une si belle personne que toi. Comme dit Céline, on ne change pas une équipe gagnante !

Mes remerciements vont aussi à Nathalie Morin et Nathalie Gauthier pour leur aide et conseils au cours de l'été à la station aquacole et à Tamara Provencher, pour ses conseils et l'aide à la familiarisation avec le logiciel Observer XT. Les étudiantes d'été Marie-Anne, Evelyne, Mathilde, sans vous il aurait été impossible d'accomplir tous les travaux nécessaires pour le bon déroulement de mon projet. Merci aussi aux stagiaires : Julie pour sa bonne

humeur, Rachel et Amélie, qui ont contribué énormément à l'installation de la salle larvaire. Merci les filles !

Ma sincère reconnaissance au Programme Canadien de Bourses de la Francophonie (PBCF). Ce fut un privilège d'avoir accès à cette bourse d'études, qui non seulement m'a permis d'entreprendre une maîtrise, mais aussi de découvrir un nouveau pays et toute une autre culture. Merci aussi à mon employeur, l'autorité des parcs nationaux des Seychelles qui m'a autorisé à m'absenter du bureau pour poursuivre mes études. Je voudrais aussi remercier toutes les institutions pour les bourses de soutien, le FRQNT, qui a financé l'ensemble du projet auquel ma maîtrise était associée, l'ISMER pour le soutien financier complémentaire, Ressources Aquatiques Québec (RAQ) et la Société canadienne de zoologie (SCZ) pour leur soutien financier en support à la participation à des congrès.

Je voudrais dire merci infiniment à mes nombreux colocataires, j'ai beaucoup apprécié de passer ces deux ans à la maison de courges avec vous. Kevin, pour ton amitié inoubliable ; Marie C, pour les aventures à l'escalade et avoir toujours été présente ; Camille, qui a toujours tes colocataires à cœur, même si tu es un peu à l'ouest parfois ; Alex, le papi Palardy, qui m'a convaincu que le freezby c'est le fun ; Anna, ça faisait plaisir d'entendre un petit peu d'anglais de temps en temps ; Anaïs, pour les petites aventures de babyfoot au sous-sol ; Eloïsa, la reine du maté ; Léo, d'être toujours prêt avec ta guitare pour nous chanter tes compositions à l'improviste ; Jeremy, qui n'a jamais eu du mal à nous sortir le fond de ses pensées ; Charles, pour son sourire et sa bonne humeur et qui est toujours prêt avec tes petits conseils de santé et aux petits soins avec tes colocataires ; Marie B, pour les super BD ; Elliott, le fruismout, roi du jardin et notre chat 'Lavi', qui était toujours là pour un petit câlin quand ça n'allait pas et tous les habitués de la maison. Sans vous, cette expérience n'aurait pas été aussi enrichissante.

À tous mes amis de Rimouski, ce fut un plaisir de vous rencontrer. Merci tout d'abord à Jeremy B, Lysane, Aubert, Filou, Tom, Maéva, Geneviève, Jeremy C, Jojo, Jean, la gang de freezby, surtout Grég, Antoine et Val. Le NÉMO et toute la promo de 2015, merci de m'avoir fait confiance pour vous représenter auprès du comité de Programme. Je tiens à

remercier aussi les membres du comité, c'était une expérience remarquable. Merci à Martine pour sa gentillesse et d'être toujours là et aux petits soins avec les étudiants.

Un grand merci à toute ma famille, pour leur encouragement quand je leur ai annoncé que je me lançais dans une telle aventure, spécialement ma mère et ma sœur. Malgré la distance vous étiez très présentes pour m'encourager.

Ce furent vraiment deux très belles années que j'ai passé à Rimouski, donc encore un grand merci à tout le monde qui a participé de près ou de loin dans cette grande aventure québécoise et qui a contribué à la réussite de ma maîtrise. Votre contribution, soutien et mots d'encouragement ont été très fortement appréciés... en gran mersi zot tou !

RÉSUMÉ

Le but de ce projet était d'explorer un domaine émergent, soit l'effet de bruit anthropique sur la faune marine. Cette étude intitulée « L'effet du son des bateaux sur le comportement alimentaire des larves de plie rouge (*Pseudopleuronectes americanus*) » avait comme objectif de déterminer si un bruit anthropique émis par un bateau de pêche affecte le comportement alimentaire des larves, soit durant la période de vie où les individus sont pélagiques. La plie est un poisson plat qui se retrouve dans des zones peu profondes de la côte Est de l'Amérique du Nord. Comme cette espèce utilise des habitats où l'activité humaine est importante, elle constitue un bon modèle pour une telle étude. Notre hypothèse était que le bruit influe sur le comportement alimentaire des larves. Nous avons donc réalisé des expériences en laboratoire au cours desquelles des aquariums contenant des larves de plie étaient placés dans un bain-marie dans lequel un son de bateau était diffusé pour les traitements « son » et comparé aux montages contrôles ou aucun son de bateau n'était diffusé. Les larves étaient filmées à l'aide de caméras placées au-dessus des aquariums et les comportements enregistrés ont été analysés avec un logiciel de traitement de comportement. À la fin de l'expérience, les individus étaient sacrifiés et photographiés pour effectuer des mesures biométriques incluant la taille de l'estomac. Les larves soumises au bruit ont montré une occurrence significativement plus faible de comportement de chasse que les larves témoins. De plus, les estomacs étaient de plus petite taille chez les larves exposées au son des bateaux, ce qui laisse supposer que les larves s'alimentaient moins en présence de bruit anthropique. Ces résultats indiquent que le son a un effet négatif sur le comportement alimentaire des larves.

Mots clés : Comportement alimentaire, plie rouge, larve, son anthropique, bruit de bateau

ABSTRACT

The aim of this research project was to explore an emerging discipline addressing the impact of anthropogenic noise on marine fauna. This study entitled « Effect of anthropogenic noise on the feeding behaviour of winter flounder larvae (*Pseudopleuronectes americanus*) », was aimed at assessing the influence of boat noise on the feeding behavior of winter flounder in its pelagic stage (i.e. larvae). Winter flounder is a flatfish species found in shallow waters off the east coast of North America. This species is present in areas of high human activity and is therefore a good model for such studies. The hypothesis was that boat noise influences the feeding behaviour of winter flounder larvae. We undertook laboratory experiments, whereby aquariums containing winter flounder larvae were placed in water-baths in which boat noise was diffused for the “noise” treatment and compared to the control aquariums in which no sound emissions were done. The larvae were filmed using cameras placed above the aquariums and their behaviour was recorded. Videos were then analyzed using a behaviour analysis software. At the end of the experiments, the larvae were sacrificed and photographed for biometric measurements including stomach size. Larvae exposed to anthropogenic noise displayed significantly less hunting events than controls. Furthermore, the stomachs were of smaller size for larvae exposed to boat noise. This suggests that feeding is impaired and that anthropogenic noise has a negative impact on larval feeding behaviour.

Keywords: Feeding behaviour, winter flounder, larvae, anthropogenic noise, vessel noise

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	ix
RÉSUMÉ.....	xiii
ABSTRACT.....	xv
TABLE DES MATIÈRES.....	xvii
LISTE DES TABLEAUX.....	xix
LISTE DES FIGURES.....	xx
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
L'IMPORTANCE DU BRUIT NATUREL.....	1
PRÉOCCUPATION GRANDISSANTE : AUGMENTATION GLOBALE DU BRUIT ANTHROPIQUE DANS LE MILIEU MARIN.....	1
DESCRIPTION DE L'ESPÈCE.....	3
La biologie de la plie rouge.....	3
Cycle de vie.....	5
Alimentation larvaire.....	7
OBJECTIFS.....	8
CHAPITRE 1 L'effet du son des bateaux sur le comportement alimentaire des larves de plie rouge (<i>Pseudopleuronectes americanus</i>).....	10
1.1 RÉSUMÉ.....	10
1.2 EFFECT OF ANTHROPOGENIC BOAT NOISE ON THE FEEDING BEHAVIOUR OF WINTER FLOUNDER LARVAE (<i>PSEUDOPLEURONECTES AMERICANUS</i>).....	12
1.3 INTRODUCTION.....	12

1.4	MATERIAL AND METHODS.....	14
1.4.1	Larval rearing.....	14
1.4.2	Experimental design.....	15
1.4.3	Rotifer production and counts	16
1.4.4	Behaviour analysis	16
1.4.5	Morphometric measurements	17
1.4.6	Statistical analysis.....	17
1.5	RESULTS.....	18
1.6	DISCUSSION.....	23
1.7	CONCLUSION	26
	DISCUSSION GÉNÉRALE.....	28
	CONCLUSION GÉNÉRALE.....	31
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	32

LISTE DES TABLEAUX

Table 1 : Sound level (in dB re1 μ Pa) measured.....	20
----------------------------------------------------------	----

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Représentation d'une plie adulte d'après Klein-MacPhee (1978)	4
Figure 2 : Le cycle de vie de la plie rouge d'après Fraboulet (2009)	6
Figure 3 : Les étapes du développement larvaire d'après Bigelow & Schroeder (1953).	7
Figure 4 : Spectrum (dB re $1\mu\text{Pa}^2 \text{Hz}^{-1}$) of recorded sounds	19
Figure 5 : Effect of boat noise on hunting behaviour of winter flounder larvae	21
Figure 6 : Effect of prey concentration on swimming behaviour of winter flounder larvae	22
Figure 7 : Mean heights of larva stomachs in the presence or absence of boat noise.....	23

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'IMPORTANCE DU BRUIT NATUREL

Le bruit naturel dans le milieu aquatique a une grande importance pour la faune marine et il est utilisé pour l'orientation, la communication, les interactions prédateurs-proies, ainsi que comme indicateur pour le choix d'habitat chez plusieurs espèces, plus particulièrement celles qui vivent en zone côtière et récifale (Montgomery et al. 2006; Götz et al. 2009; Stanley et al. 2010; Slabbekoorn et al. 2010). Cependant, au cours des dernières années, les bruits anthropiques présents en milieu marin ont augmenté significativement suite à la hausse du trafic maritime, du développement de la mariculture, du nombre croissant d'installations d'éoliennes en mer et de turbines marémotrices, ainsi qu'à l'augmentation de recherche sismique et d'installations en mer par des compagnies pétrolières (Popper & Hastings 2009; Slabbekoorn et al. 2010; Pine et al. 2012).

PRÉOCCUPATION GRANDISSANTE : AUGMENTATION GLOBALE DU BRUIT ANTHROPIQUE DANS LE MILIEU MARIN

Bien qu'il y ait un intérêt certain pour mieux identifier les effets du bruit anthropique sur les espèces marines, la majorité des études ont été menées sur de gros animaux tels que des mammifères marins et nous n'avons que peu d'informations de son effet sur les invertébrés ou les poissons (Hawkins & Popper 2017). De plus, les études menées sur les poissons portent le plus souvent sur des individus adultes (Pine et al. 2012). En milieu naturel bien que les poissons adultes soient capables de fuir de telles perturbations, ce n'est pas le

cas pour les stades de développement qui dérivent plus ou moins passivement et qui ont donc une capacité réduite ou inexistante de se déplacer activement (Popper & Hastings 2009). La présence de bruit anthropique de longue durée, par exemple celui émis par des bateaux, a le potentiel d'avoir des impacts sur de larges zones et donc sur un grand nombre d'espèces (Slabbekoorn et al. 2010). Il pourrait ainsi avoir des conséquences telles qu'une réduction de la capacité auditive induisant des difficultés à entendre ou à localiser des sons, affectant ainsi potentiellement les relations prédateurs-proies (Slabbekoorn et al. 2010). Le comportement de chasse, le succès reproducteur ou encore la survie des individus sont d'autres éléments sur lesquels le bruit pourrait avoir un impact (Purser & Radford 2011).

Nous ne disposons que de peu d'informations sur l'impact du son des bateaux sur les larves, leurs comportements ou plus précisément leur comportement alimentaire. Une des rares études réalisées sur des larves de poissons a été menée par Nedelec et al. (2015) sur la morue franche, *Gadus morhua*. Les auteurs ont vérifié l'effet de sons de bateaux sur le comportement, la croissance et le développement des larves. Ils ont démontré que le son induit des comportements de fuite plus fréquents, une diminution de croissance ainsi qu'une absorption plus rapide du sac vitellin (Nedelec et al. 2015). Chez des juvéniles de poisson demoiselle, *Pomacentrus amboinensis*, une réduction des réactions et de la rapidité des mouvements de fuite en réponse aux attaques de prédateurs a été observée suite à une exposition au bruit de bateau (Simpson et al. 2016). Par ailleurs, d'autres études réalisées sur des poissons adultes, tels que celle de Purser & Radford (2011) sur des épinoches, *Gasterosteus aculeatus*, illustrent qu'en présence de bruit acoustique similaire à celui d'un passage d'un bateau à moteur, les individus montrent une réduction dans leur efficacité de recherche de nourriture, plus d'attaques étant nécessaires pour capturer la même quantité de proies qu'en absence de bruit. D'une part, plus d'erreurs étaient induites au cours des tentatives de capture de proie et, d'autre part, les individus confondaient proies et autres particules présentes dans l'eau (Purser & Radford 2011). Comme souligné par Popper & Hastings (2009), bien que de nombreuses craintes soient exprimées concernant les effets potentiels du son chez les poissons nous ne disposons pas actuellement de données suffisantes

pour confirmer ou infirmer celles-ci. Notre objectif était donc d'étudier l'effet de bruit anthropique sur la faune marine et nous avons choisi les larves de plie rouge comme modèle.

DESCRIPTION DE L'ESPÈCE

La biologie de la plie rouge

La plie rouge (*Pseudopleuronectes americanus*) est une espèce de poisson plat (Fig. 1), qui se trouve dans le nord-ouest de l'océan atlantique, plus exactement jusqu'à la côte du Labrador au nord, dans le golfe du Saint-Laurent jusqu'à la Géorgie au sud, les densités étant plus importantes dans la zone centrale de sa distribution (Bigelow & Schroeder 1953; Scott & Scott 1988; Pereira et al. 1999). La répartition de la plie rouge est en partie liée à la disponibilité de nourriture dans le milieu (Tyler 1971). Au printemps et à l'été, les adultes migrent dans la zone intertidale, où se trouve une abondance de nourriture qui contribue significativement à leur croissance annuelle (Vaillancourt 1982). L'efficacité à rechercher de la nourriture, plus spécifiquement la capacité d'avoir une fréquence d'alimentation optimale à un coût énergétique moindre est vitale pour la survie des individus (Purser & Radford 2011). La plie est un prédateur visuel, donc la luminosité est un facteur important affectant l'alimentation (Olla et al. 1969; Klein-MacPhee 1978; Scott & Scott 1988). La quantité et la durée de l'alimentation varient en fonction de l'intensité de lumière disponible, ce qui fait que les individus se nourrissent de façon importante à l'été avec une réduction ou même un arrêt d'alimentation en hiver (Van Guelpen & Davis 1979; Vaillancourt et al. 1985; Scott & Scott 1988).

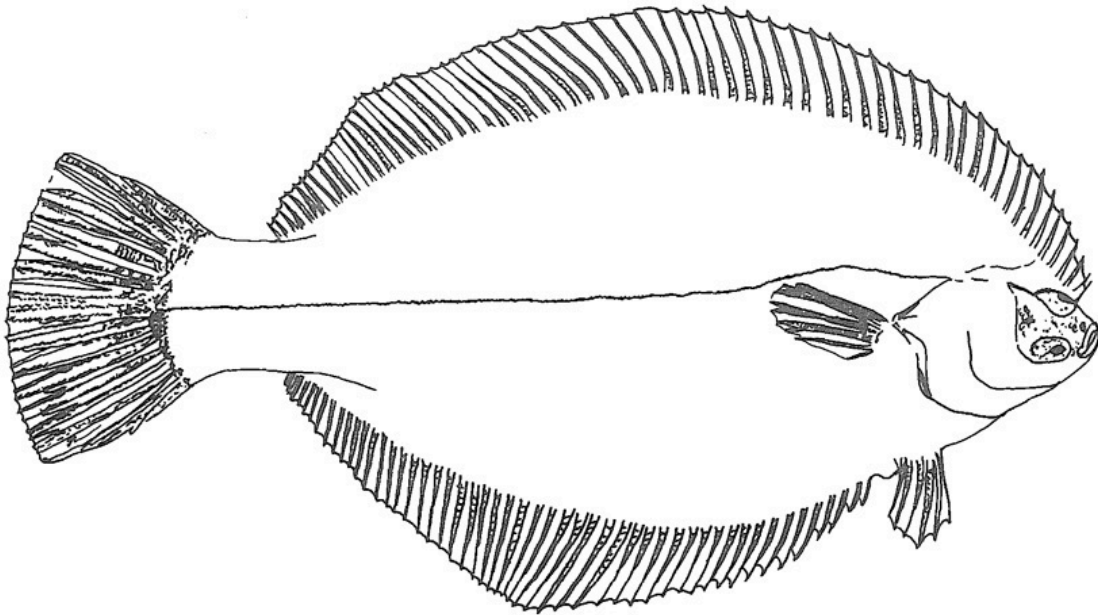


Figure 1 : Représentation d'une plie adulte d'après Klein-MacPhee (1978)

La plie rouge est une espèce necto-benthique qui vit sur des fonds meubles, à des profondeurs inférieures à 40 m (McCracken 1963; Scott & Scott 1988; MPO 2002). C'est une espèce qui est à la fois eurytherme et euryhaline (Litvak 1999; Pereira et al. 1999). Les individus de tout âge se trouvent dans des eaux de température variant entre 0 et 25 °C, et peuvent survivre à des températures inférieures à -1°C grâce à la présence de protéines antigel (Duman & Devries 1974; Fletcher 1977). Cette espèce tolère également des changements de salinité entre 4 et 30 ‰ (Klein-MacPhee 1978). Ce sont ces caractéristiques clés qui permettent à la plie rouge de s'adapter aux différentes conditions environnementales nécessaires à l'accomplissement de son cycle vital.

Cycle de vie

La plie adulte atteint la maturité sexuelle à une longueur de 200 - 250 mm (Klein-MacPhee 1978; MPO 2002), la taille étant un facteur plus important que l'âge des individus (Pereira et al. 1999). En général, les adultes se trouvent dans des zones plus profondes, et ils migrent vers des zones peu profondes, pendant la saison de reproduction. Le frai s'étale de l'hiver au début du printemps, dépendamment de la distribution latitudinale (Van Guelpen & Davis 1979; Scott & Scott 1988; Pereira et al. 1999) (Fig. 2). La fécondation des gamètes se fait dans la colonne d'eau et les œufs qui font en moyenne 0.8mm sont démersaux et se fixent en agglomérats sur le fond (Klein-MacPhee 1978; Scott & Scott 1988; Litvak 1999). À l'éclosion, les larves restent dans des zones littorales peu profondes (Scott & Scott 1988; Pereira et al. 1999).

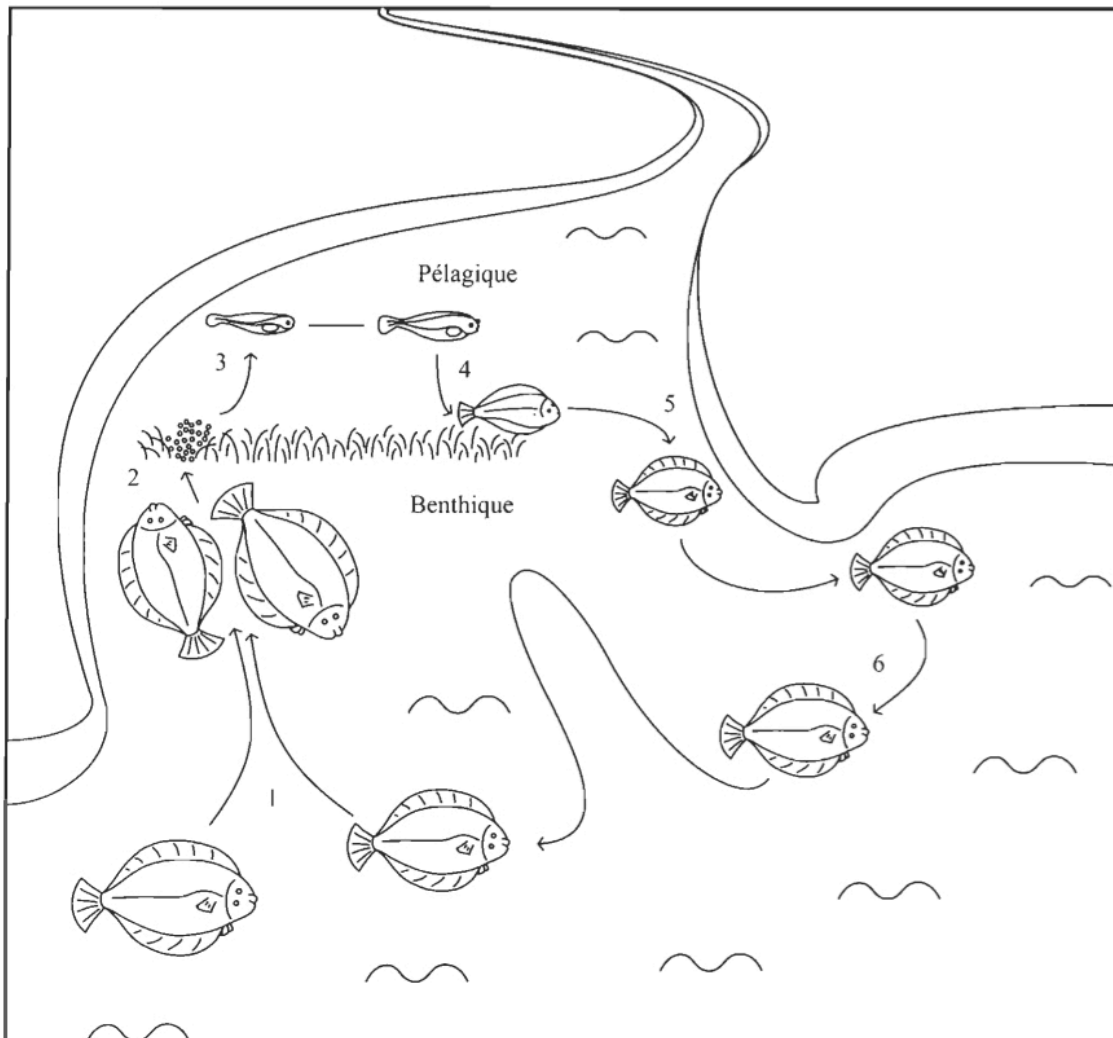


Figure 2 : Le cycle de vie de la plie rouge d'après Fraboulet (2009). (1) migration dans des zones côtières, (2) fécondation, (3) éclosion, (4) établissement sur le fond, (5) premier hiver, (6) migration des individus matures vers des zones plus profondes

La durée de la phase pélagique chez les larves dépend de la température du milieu (Chambers et al. 2001). En général, la métamorphose a lieu vers 360 - 400 degrés-jours et marque la fin de la phase larvaire (Chambers & Leggett 1987; Ben Khemis et al. 2003) (Fig.3). La métamorphose est une phase critique, caractérisée par une forte mortalité, durant laquelle la larve subit des transformations morphologiques et physiologiques et passe d'un

stade larvaire pélagique à un stade benthique juvénile (Pereira et al. 1999; Montgolfier et al. 2005; Geffen et al. 2007). Ces transformations incluent, entre autres, une migration de l'œil gauche vers la droite, un changement d'orientation du corps de 90° et des modifications des organes (Montgolfier et al. 2005; Geffen et al. 2007).

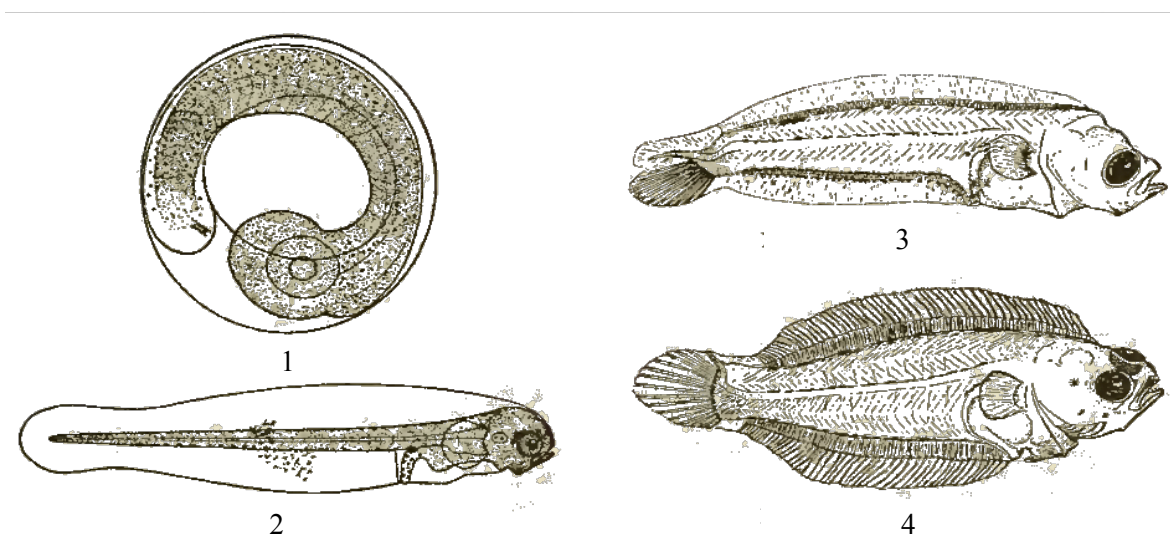


Figure 3 : Les étapes du développement larvaire d'après Bigelow & Schroeder (1953). (1) l'œuf, (2) larve après l'absorption de sac vitellin, (3) apparition de nageoire, (4) migration de l'œil en cours.

Alimentation larvaire

Ces transformations et le changement de l'habitat induisent une altération dans le régime alimentaire bien que les larves démersales des poissons plats continuent à consommer du plancton pélagique jusqu'à l'atteinte finale du stade benthique tel que chez la plie japonaise *Paralichthys olivaceus* (Yamashita et al. 2001). La plie rouge est une espèce omnivore (Bigelow & Schroeder 1953; Kennedy & Steele 1971; Vaillancourt 1982; Link et al. 2002). À l'éclosion les larves se nourrissent de leur sac vitellin jusqu'à l'ouverture de la bouche (Sullivan 1915; Buckley 1982; Ben Khemis et al. 2000; Vaillancourt 2008). Leur

estomac n'est pas développé et leur capacité digestive est réduite au début de leur alimentation (Ben Khemis et al. 2003). En milieu naturel, une fois que le sac vitellin est résorbé, la bouche devient fonctionnelle et les premiers aliments exogènes des larves de plie rouge sont des diatomées (Sullivan 1915; Klein-MacPhee 1978). Plus tard, les larves se nourrissent de plancton incluant des nauplii, des copépodes, des polychètes, des œufs et des invertébrés et la préférence alimentaire change en fonction de l'âge des individus (Pereira et al. 1999).

OBJECTIFS

Les zones côtières sont connues pour avoir un niveau élevé de bruit associé aux activités humaines (Pereira et al. 1999). Gervaise et al. (2012) ont noté une augmentation locale du bruit ambiant dans le Saint-Laurent, mais il existe bien peu d'études qui nous permettent de confirmer ou infirmer si cette augmentation du bruit anthropique a un effet sur la faune marine. Les premiers stades de développement des vertébrés marins sont peu développés, se déplacent souvent de façon passive et ne peuvent donc éviter l'exposition à ces bruits, raison pour laquelle nous avons pensé effectuer des tests d'exposition sur des larves de plie rouge. Il n'existe aucune information sur l'impact du bruit anthropique sur le comportement de la plie rouge en général, ni sur le stade larvaire pourtant étudié dans plusieurs laboratoires. Les caractéristiques biologiques de l'espèce, incluant le stade larvaire et la répartition géographique de ses habitats en font un bon modèle pour étudier les effets des bruits anthropiques sur la faune marine. L'objectif spécifique de ce projet de maîtrise était de vérifier l'effet du son des bateaux sur le comportement alimentaire des larves de plie rouge.

Les mortalités sont très importantes au stade larvaire et plusieurs facteurs « non contrôlés » peuvent affecter la survie. Les élevages larvaires demeurent des activités risquées sur le long terme et une étude d'exposition au bruit, à long terme, comportait trop de risques d'interactions avec différents facteurs sur lesquels nous avons peu ou pas de contrôle (ex.

occurrence d'infections bactériennes ou virales qui peuvent décimer des élevages en 24 heures). Parmi les effets possibles du bruit, on peut penser aux interactions prédateurs-proies qui elles peuvent être étudiées sur de courtes périodes. Tester l'effet de la prédation sur les larves se serait avéré difficile en laboratoire, mais tester cette relation entre les larves et leurs proies était réaliste dans le cadre des informations et compétences disponibles dans notre laboratoire. Nous avons donc axé le projet sur l'étude des effets du bruit sur le comportement alimentaire. Plus spécifiquement, nous avons testé l'hypothèse que le son des bateaux affecte le comportement de chasse des larves de plie rouge et diminue le succès d'alimentation des larves sur des proies vivantes. Pour ce faire, le comportement des larves a été étudié en présence et absence de son de bateau et ce à trois densités de proies différentes afin de vérifier si les effets du bruit ne sont présents qu'en présence de faible abondance de proies.

CHAPITRE 1
L'EFFET DU SON DES BATEAUX SUR LE COMPORTEMENT
ALIMENTAIRE DES LARVES DE PLIE ROUGE (*PSEUDOPLEURONECTES*
***AMERICANUS*)**

1.1 RÉSUMÉ

Cette étude évalue l'effet du son des bateaux sur le comportement alimentaire des larves de plie rouge (*Pseudopleuronectes americanus*). La plie rouge habite les zones peu profondes de la côte Est de l'Amérique du Nord. Comme cette espèce utilise des habitats où l'activité humaine est importante, elle constitue un bon modèle pour évaluer les effets des bruits anthropiques sur la faune marine. La présente étude a pour objectif de déterminer si un bruit anthropique émis par un bateau de pêche affecte le comportement alimentaire chez cette espèce et particulièrement durant la période larvaire alors que les individus sont pélagiques. Les mesures effectuées indiquent que les estomacs sont plus petits en présence de son, ce qui suggère que les larves s'alimentent moins en présence de bruit anthropique. Les mesures comportementales soutiennent cette hypothèse, car les larves soumises au bruit montrent une occurrence significativement plus faible de comportement de chasse. Le son a donc un effet négatif sur le comportement alimentaire des larves.

Cet article intitulé « Effect of anthropogenic noise on the feeding behaviour of winter flounder larvae (*Pseudopleuronectes americanus*) » a été rédigé par moi-même et a été corrigé et commenté par mon directeur Céline Audet, mes co-directeurs Réjean Tremblay et Gesche Winkler et mes collaborateurs Aurélie Jolivet, Laurent Chauvaud et Frédéric Oliver. Ma contribution comme premier auteur a été de faire la revue de littérature, d'élaborer le protocole expérimental, d'exécuter les expériences, de mener l'ensemble des analyses comportementales et morphométriques et de rédiger l'article et le mémoire. Réjean

Tremblay, deuxième auteur, a participé à la supervision de l'expérience, a contribué à la mise en place de la méthode, a participé à la révision de l'article et aidé à l'acquisition du matériel. Aurélie Jolivet supervisée par Laurent Chauvaud (cinquième auteur) a géré les aspects sonores et fourni le matériel. Elle a également géré les données de son et contribué à la révision de l'article. Frédéric Olivier, le quatrième auteur, a contribué à la supervision de l'expérience et a participé à la révision de l'article. La sixième auteur, Gesche Winkler, a supervisé, donné des conseils sur la méthodologie et a participé à la révision de l'article. Finalement, ma directrice Céline Audet, septième auteure, a dirigé la recherche à partir du début pour le développement de la méthode, tout au cours de l'élevage larvaire, de l'analyse des résultats ainsi qu'à la révision de l'article. Elle a aussi mis à ma disposition l'ensemble du dispositif nécessaire pour la larviculture. Ce travail a été présenté lors de la session d'affiches de la réunion annuelle de Ressources Aquatiques Québec (RAQ) à Québec en novembre 2016, puis en présentation orale à la 56^{ième} conférence de la Société canadienne de zoologie (SCZ) en mai 2017 à Winnipeg.

1.2 EFFECT OF ANTHROPOGENIC BOAT NOISE ON THE FEEDING BEHAVIOUR OF WINTER FLOUNDER LARVAE (*PSEUDOPLEURONECTES AMERICANUS*)

Gilberte Gendron¹, Réjean Tremblay¹, Aurélie Jolivet², Frédéric Olivier³, Laurent Chauvaud⁴, Gesche Winkler¹, Céline Audet¹

¹ Institut des Sciences de la Mer, Université du Québec à Rimouski, 310 allée des Ursulines, Rimouski, QC, Canada G5L 3A1,

² TBM environnement/Somme, 115 rue Claude Chappe, Technopole Brest Iroise, F-29280 Plouzané, France

³ Muséum national d'Histoire naturelle, UMR BOREA 7208, CNRS/MNHN/UPMC/IRD, Station Marine de Concarneau, Place de la Croix, BP 225, 29182 Concarneau cedex, France

⁴ Institut Universitaire Européen de la Mer (UMR CNRS 6539), Université de Bretagne Occidentale, rue Dumont, d'Urville, F-29280 Plouzané, France

1.3 INTRODUCTION

Natural noise in the aquatic environment is used by marine organisms for orientation, communication among individuals, predator avoidance, and prey detection, and can also be used as a larval settlement cue in various species, especially among those residing in coastal areas (Montgomery et al. 2006; Götz et al. 2009; Slabbekoorn et al. 2010; Stanley et al. 2010; Holles et al. 2013). However, anthropogenic underwater noise resulting from increasing maritime navigation, offshore wind and tidal turbines, mariculture facilities, piling installation, and seismic surveys for oil and gas exploration can have detrimental impacts on many marine organisms (Southall et al. 2007; Popper & Hastings 2009; Slabbekoorn et al. 2010; Pine et al. 2012; Popper et al. 2014). These negative effects will likely increase since anthropogenic noise levels are rising with increasing human activities.

Most studies dealing with the effects of anthropogenic noise on aquatic species have focused on large charismatic animals such as marine mammals. Less attention is given to invertebrates and fish (Hawkins & Popper 2017), and most studies have been done on adults, omitting generally smaller organisms or developmental stages such as fish larvae (Pine et al. 2012). In the presence of acoustic noise, adult three-spined sticklebacks, *Gasterosteus aculeatus*, showed a decrease in foraging performance (Purser & Radford 2011). In juvenile Ambon damselfish, *Pomacentrus amboinensis*, a decrease in reaction and response speed to predator attacks was observed when individuals were exposed to boat noise (Simpson et al. 2016). Similarly, in a field study on the brown meagre, *Sciaena umbra*, boat noise induced longer flight reaction times and increased the number of individuals undertaking flight and the frequency of hiding behaviours (La Manna et al. 2016). Studies on fish larval stages are more limited. One rare example is the laboratory experiment by Nedelec et al. (2015) that characterized the impacts of ship noise on the behaviour, growth, and development of larval Atlantic cod, *Gadus morhua*. Using repeated exposures to regular and random playback recordings, they showed more frequent startle responses, a reduction in growth, and a more rapid absorption of the yolk sac in the presence of noise Nedelec et al. (2015).

As pointed out by Popper & Hastings (2009), there are growing concerns about the effects of noise on fish, but little data are available. Winter flounder (*Pseudopleuronectes americanus*) is a dominant benthic species in the St. Lawrence estuary. This flatfish species has a high aggregation abundance within this region (Bigelow & Schroeder 1953; Pereira et al. 1999), where a local rise in ambient noise levels has been noted (Gervaise et al. 2012). The winter flounder is euryhaline and eurythermal (Litvak 1999). Like many marine vertebrates, winter flounder has a complex life cycle. Upon hatching, larvae are pelagic until they undergo metamorphosis to the juvenile stage (Pereira et al. 1999). Larvae are visual feeders and spend most of the critical periods of their development in shallow coastal areas, which are especially vulnerable to boat noise. We therefore considered that they may be a good model to assess the impact of anthropogenic noise on marine fauna.

The main objective of this study was to assess the impact of motorized boat noise on the feeding behaviour of winter flounder larvae. Studying feeding behaviour allowed short-term duration experiments which was considered essential considering the high mortalities occurring during larval rearing in laboratory conditions. We tested the hypothesis that anthropogenic vessel noise would impair hunting rate and hunting success during feeding on live prey. We also tested whether prey density may modify the effect of vessel noise on feeding behaviour.

1.4 MATERIAL AND METHODS

1.4.1 Larval rearing

Mature winter flounder females were caught in the Baie des Chaleurs offshore of Bonaventure (QC, Canada) during the breeding season and brought to the Station aquicole de l'ISMER (Rimouski, QC, Canada; 48° 31' N; 68° 28' W). Fertile males were available at the wet lab facility. Egg fertilization and incubation were done according to the method described by Vagner et al. (2013). Upon hatching, larvae were transferred into 55 L cylindrical fiberglass tanks lined with a dark-green coating in a temperature-controlled room (10°C). A 12h:12h L:D photoperiod was set. An average of 56,000 larvae (1000 larva L⁻¹) was added per tank; aeration and a constant flow of filtered (1 µm) seawater were provided. Upon mouth opening, water circulation was stopped for 9 h during daytime and marine microalgae (Nanno 3600, Reed Mariculture Inc, USA) were added to the tanks to avoid wall syndrome. At this time, larvae were then fed with rotifers, *Brachionus plicatilis*, and commercial diet (GEMMA Wean 0.3, SKRETTING, France) was added to their regime at 227 degree days.

1.4.2 Experimental design

Winter flounder larvae after 356 degree days (average size $4.77 \text{ mm} \pm 0.51 \text{ SD}$) were used for the experiments. Three different concentrations (individuals per mL) of rotifers were tested, i.e., low (5 ± 0.6), medium (11 ± 2.0), and high (14 ± 0.8), in the presence or absence of boat noise.

Four aquariums were placed in water baths in a calm, isolated room. Temperature and salinity (27‰) were the same as those measured at the pumping station at the time of the experiment. Temperature was recorded with probes (Onset Hobo Water Temp Pro V2 Data logger U22-001); the average temperature was $12.1 \pm 0.4^\circ\text{C}$ with a mean increase of $1.2 \pm 0.2^\circ\text{C}$ between the start and end of experiments (2 h). Low-intensity lights were installed above each aquarium. Waterproof speakers (AQUA 30, DNH, 8 Ohms, 80–20,000 Hz) plugged to an amplifier (Plug & Play 12 W) were installed in two of the four aquariums. The sound emission of an 11 m long passing boat fitted with a 300 hp motor was recorded and adjusted to match natural conditions (sound level: 130 dB re $1\mu\text{Pa}$ between 100 and 10 000 Hz; Jolivet et al. [2016]) was used. A sound test was undertaken prior to each experiment using a digital recorder (Song Meter SM2+; Wildlife Acoustics) connected to a hydrophone (HTI-96 MIN; High Tech, Inc.) to ensure the sound level of vessel noise and the silent conditions in control aquariums.

For each aquarium, a mean of twenty larvae (range 19–21) were placed in 1.8 L of filtered seawater ($10 \mu\text{m}$) to acclimate for one hour prior to the start of the experiment. Aquariums and water baths were filled with fresh seawater prior to each set of experiments. All larvae had last been fed in the early evening the day before the experiment to ensure successful feeding during the experiments. A digital camera (GoPro, Hero+ LCD CHDHB-401) fitted with a macro filter (Polar Pro, macro filter 15-06746) was installed above each aquarium to record larval behaviour for two hours following the acclimation period. This experiment was repeated four times for a total of four experiments per treatment. Larval behaviour was monitored individually for $20 \text{ larvae} \times \text{two aquariums} \times \text{four trials}$, for a total

of 160 larvae per treatment (presence or absence of boat noise). Different prey densities characterized the different trials: low prey density was present in the first trial ($n = 40$ larvae), medium prey density in the second and third ($n = 80$), and high prey density in the fourth trial ($n = 40$).

1.4.3 Rotifer production and counts

Rotifers were reared in an 18 L tank and fed with Selco® S.parkle (INVE Aquaculture Ltd., Thailand) four times a day. The culture concentration was estimated every morning and the volume of culture needed to reach a given prey concentration in each experimental aquarium was calculated.

After the one-hour acclimation period, the video recording was started, rotifers (prey) were added to each experimental aquarium, and seawater was added to top-up each aquarium to 2 L. Subsamples of rotifer cultures and seawater from each aquarium at the end of the experiments were filtered on a 10 μm sieve and preserved in 95% ethanol for prey concentration assessment. Rotifer concentration was estimated both before and after the experiments by diluting the filtered rotifer samples in 80 mL of ethanol and counting rotifers in 3 mL aliquots under binocular microscope (three aliquots for each sample).

1.4.4 Behaviour analysis

The videos were analyzed using Noldus Observer XT 9.0 software (Noldus Information Technology Inc., Leesburg, VA, USA). Only larvae found within a delimited square on the bottom of the aquarium were considered. A period of twelve minutes, from minute 12 to 24 of the two-hour video, was analyzed for occurrence frequencies and duration of each behavioural trait (in seconds) for each replicate and for each larva present in the observation field, giving a total of 132 larvae in the absence and 117 in the presence of boat

noise. The various observed and recorded behaviours were set to be mutually exclusive state events except for hunting, which was considered as a point event. The following behaviours were recorded: (1) *Hunting*: larva moves rapidly with a wiggling movement; (2) *Swimming*: larva moves around actively in the water column; (3) *Resting*: larva undertakes no active movement but rather stays motionless on the bottom or floats passively; (4) *Out*: larva swims out of the observation field.

1.4.5 Morphometric measurements

At the end of each experiment, all larvae were recovered and sacrificed. A side view photo was taken using a digital camera (Evolution VF, Media Cybernetics) fixed on a binocular microscope at magnification 20X (Olympus SZ61 model SZ2-ST; Olympus Corporation, Tokyo, Japan) that was connected to a personal computer. A cold light source (NCL 150; Volpi, USA) was used to illuminate specimens. Length and eye diameter (to ensure larvae were of similar sizes) as well as the stomach height of each individual were measured on each photo using image processing software (Image-Pro Express 5.1.0.12; Media Cybernetics, Inc., USA).

1.4.6 Statistical analysis

Analyses were performed using STATISTICA software (STATISTICA 6.1, StatSoft Inc., France). Normality and homoscedasticity were verified using Kolmogorov-Smirnov and Levene tests, respectively. Two-way analysis of variance (ANOVA) was used to determine significant differences in larval feeding and swimming behaviour as a function of the presence or absence of boat noise and prey concentration (low, medium, high). Student's T-tests were used to determine significant differences in morphometric measurements.

1.5 RESULTS

Underwater sound recording

Replayed vessel noise in the two aquariums was homogenous, with 129 and 127 dB re 1 μ Pa between 100 and 1,000 Hz, corresponding to the in situ recorded source signal (Table 1, Fig. 4; aquariums 3 and 4). The sound levels measured in the two aquariums under silent conditions differed from the other two (Table 1, Fig. 4; aquariums 1 and 2). The sound levels in the aquarium with no sound treatment were slightly higher than the conditions before the experiments (Table 1) but remained consistent with natural conditions as defined by Wenz's formula (Wenz 1962) (Fig. 4).

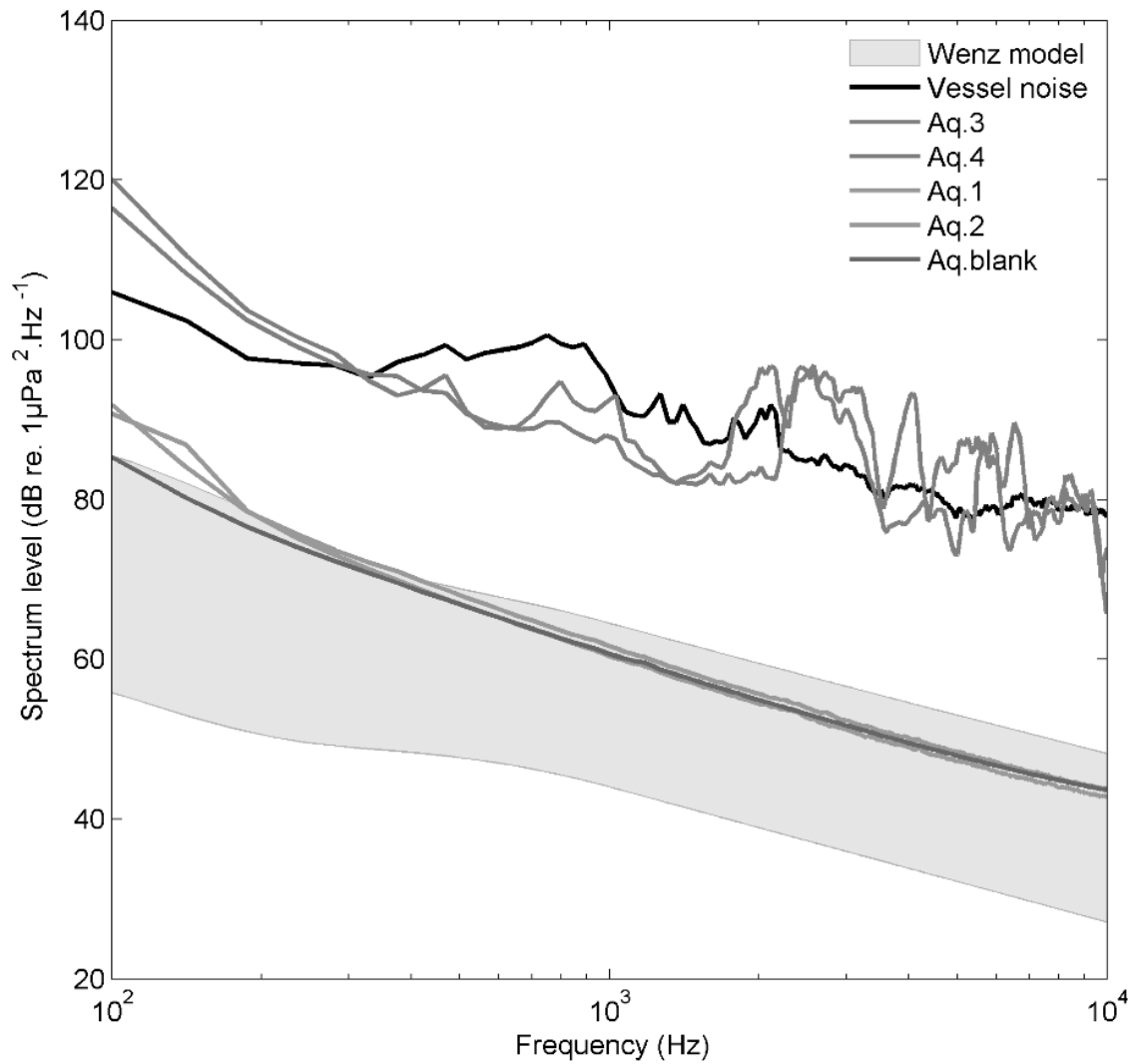


Figure 4 : Spectrum (dB re $1\mu\text{Pa}^2 \text{Hz}^{-1}$) of recorded sounds: boat noise recorded in situ (black line), in the two aquariums with sound treatment (gray lines), and in the two aquariums with no sound treatment (dark gray lines). The gray shaded area corresponds to variations of natural ambient noise estimated from Wenz's formula for different wind (wind speeds from 0 to 10 m s^{-1}) and traffic (traffic density from 1 to 7) conditions

Table 1 : Sound level (in dB re $1\mu\text{Pa}$) measured: (1) *in situ* for the ambient vessel noise recorded during three passages of the boat; (2) before experiments in the four aquariums; and (3) during experiments in the two aquariums with sound emission and in the two aquariums under silent conditions

	100-1 000 Hz	1 000-10 000 Hz
(1) In situ		
Vessel noise <i>in situ</i> (3 passages)	130 ± 2	123 ± 2
(2) Before experiment		
Aquariums	101 ± 7	91 ± 7
(3) During experiment		
Aquarium 1 (silent)	105	90
Aquarium 2 (silent)	103	91
Aquarium 3 (noisy)	129	126
Aquarium 4 (noisy)	127	127

Behaviour analysis: Hunting

The variation in prey concentration had no effect on the hunting behaviour ($P = 0.28$, $F_{2, 243} = 1.28$): the average number of hunts per individual per 12 min was 7.3 ± 8.1 . There was no interaction between prey concentration and sound treatment ($P = 0.18$, $F_{2, 243} = 1.71$) on hunting. However, hunting attempts were more frequent in the absence of sound compared to the treatment when sound was present ($P = 0.01$, $F_{1, 243} = 6.75$; Fig. 5).

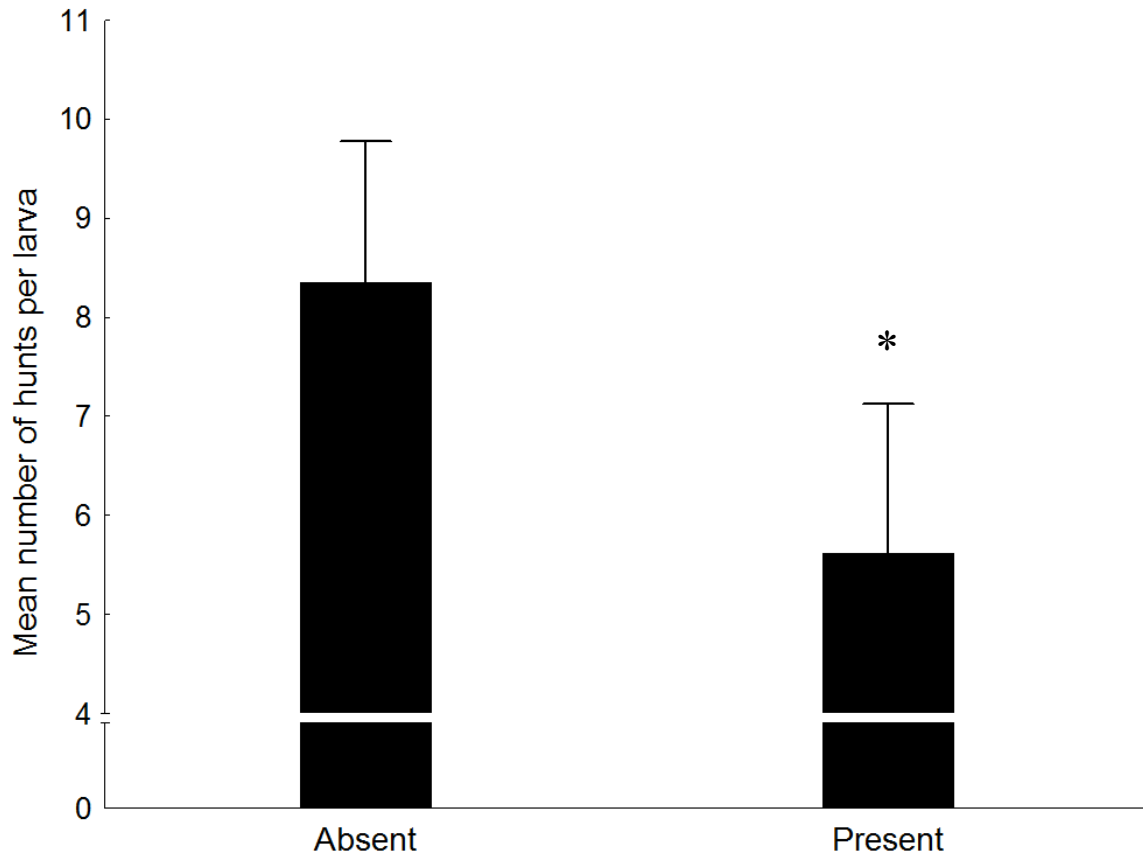


Figure 5 : Effect of boat noise on hunting behaviour of winter flounder larvae

Behaviour analysis: Swimming activity

While prey concentration significantly affected the proportion of time the larvae were swimming ($P = 0.04$, $F_{2, 243} = 3.36$; Fig. 6), there was no interaction between prey concentration and sound treatment ($P = 0.48$, $F_{2, 243} = 0.74$) on the time larvae spent swimming. Larvae spent more time swimming when prey concentration was low and less time swimming in the medium prey concentration condition; swimming activity was intermediate in the high prey concentration conditions. However, these differences were not significant according to post-hoc analyses. The presence and absence of boat noise did not significantly influence swimming activity ($P = 0.57$, $F_{1, 243} = 0.32$; $64 \pm 39.8\%$ vs. $68 \pm 36.7\%$).

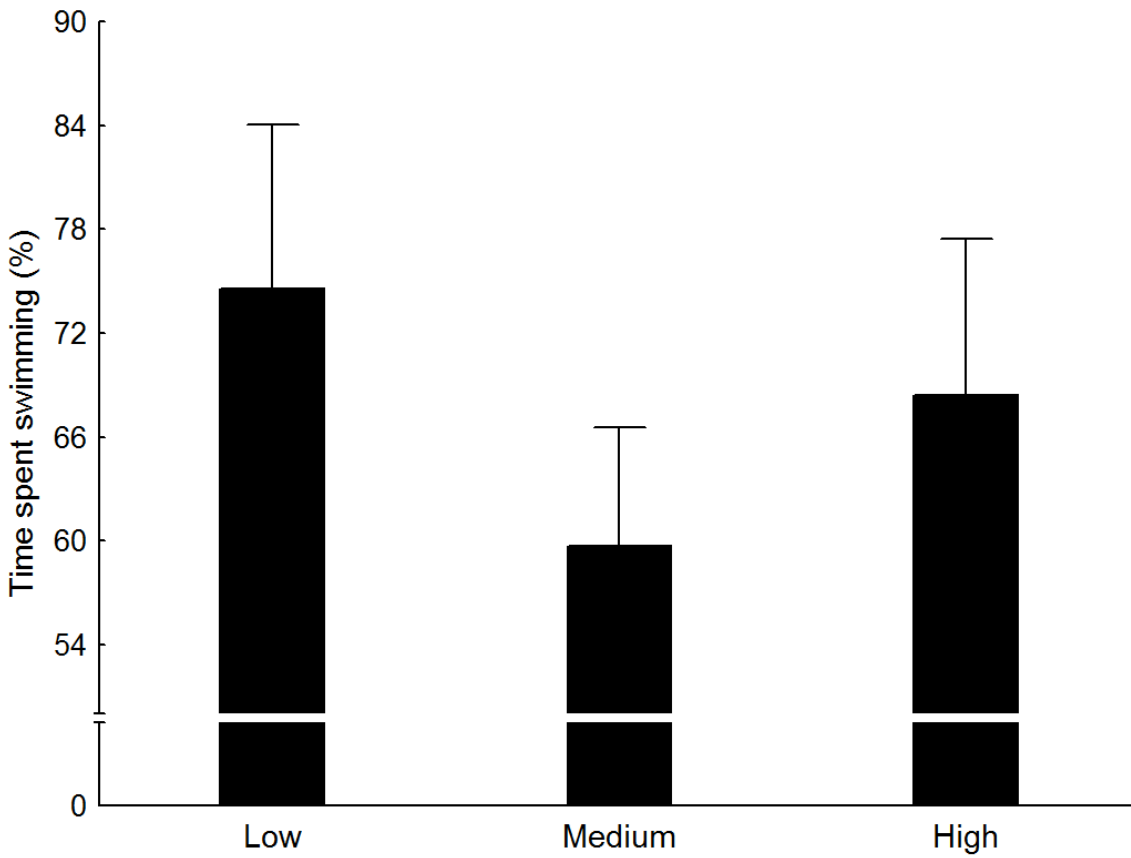


Figure 6 : Effect of prey concentration on swimming behaviour of winter flounder larvae

Morphometric measurements

Despite similar mean larval lengths between the two treatments ($P = 0.67$), mean stomach size was significantly smaller when larvae were exposed to boat noise ($P = 0.01$; Fig. 7).

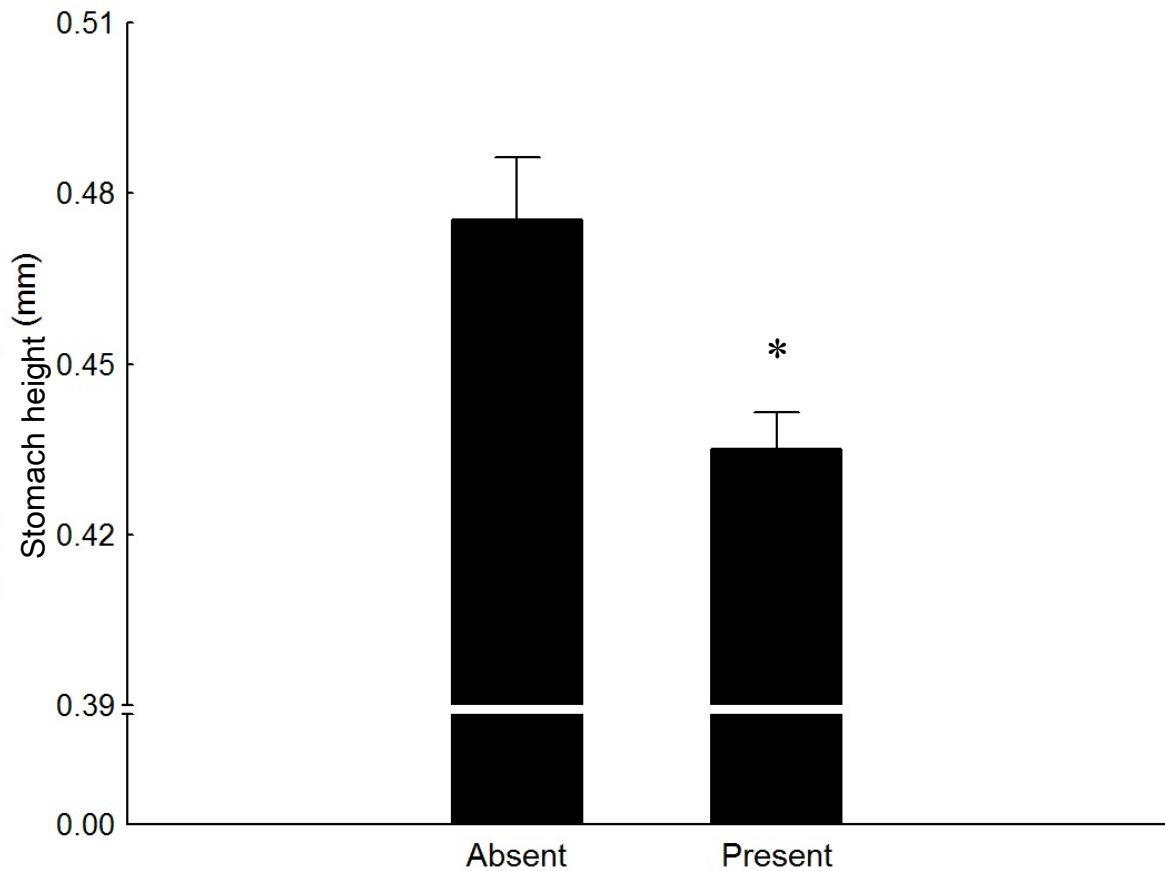


Figure 7 : Mean heights of larva stomachs in the presence or absence of boat noise

1.6 DISCUSSION

The presence of noise had a significant effect on the hunting behaviour of winter flounder larvae. Larvae exposed to boat noise spent less time hunting and had smaller stomach heights compared to those with no sound exposure. This suggests that more prey were consumed in the absence of boat noise. To our knowledge, this is the first study to test the effect of anthropogenic noise on the feeding behaviour of larval flatfish. Successful foraging is vital for survival, especially at this crucial stage preceding metamorphosis. Boat noise reduces the feeding rate and may thus have detrimental effects on an individual's fitness by decreasing the larval survival rate (Purser & Radford 2011; Voellmy et al. 2014).

Our results agree with those obtained on adult three-spined stickleback in laboratory conditions (Purser & Radford 2011). These authors noted a decrease in foraging performance resulting from (1) the misidentification of food versus non-food items as shown by an increased number of attacks on the latter and (2) less successful attacks on food items under noisy conditions due to an increase in food-handling errors (Purser & Radford 2011). In the present study, fewer attacks were observed under boat noise conditions and a significantly smaller larval stomach height was found, suggesting that many of the observed hunting attempts were not successful. Furthermore, a comparable laboratory experiment was conducted by Voellmy et al. (2014), who tested the effects of acoustic noise on adult three-spined stickleback and European minnow, *Phoxinus phoxinus*. These authors obtained similar results in that fewer hunting strikes were made by both sympatric species. However, the way in which foraging success was reduced differed: the three-spined stickleback made more foraging errors whereas the European minnow showed a decrease in foraging efforts. The latter corresponds to the behaviours we observed in winter flounder larvae, which, as Purser & Radford (2011) suggested, may be related to a shift in attention. Luo et al. (2015) proposed three ways by which noise pollution can affect fish foraging: acoustic masking, reduction of attention, and noise avoidance behaviours. Unfortunately, the present experiment did not allow us to evaluate the presence of acoustic masking or avoidance behaviours.

Purser & Radford (2011) showed that punctual or continuous exposure to anthropogenic noise does not necessarily lead to differential foraging effects. This supports the hypothesis that the point interval and durations of videos analyzed for the treatments did not influence the final outcome of our observations. Furthermore, since all larvae were last fed the night before the experiments and were of similar size, the observed variation in stomach volume supports the conclusion that larvae had a higher feeding success in the absence of noise. Licois (2006) confirmed that starving winter flounder juveniles (6.4 to 12.2 mm in total length) for 16 hours was sufficient to eliminate prey from the digestive system. This supports our assumptions that the digestive systems of each larvae was empty at the start of the experiments. Furthermore, larvae are transparent at this stage of development,

therefore the opaque stomach area observed at the end of the experiment indicated the ingestion of prey and could be easily delineated.

Prey concentration had no effect on the occurrence of hunting events. It may be argued that the lowest prey concentration was sufficient to fulfill larval needs. Laurence (1977) determined that the critical prey concentration needed for winter flounder larvae to meet growth and metabolic energy requirements is around 0.6 copepod nauplii per mL compared to the mean of five rotifers per mL used in the present study. Heinle & Flemer (1975) confirmed a nauplii concentration of *Eurytemora affinis* as high as 2.8 individuals per mL in Chesapeake Bay, which was quantified by Laurence (1977) to be more than adequate for growth and survival of winter flounder larvae. The lowest prey concentration that we used was 4.4 rotifers per mL. According to Hansen et al. (1994), both nauplii and rotifers have a similar spherical diameter. Therefore, if one considers the size ratio 1:1 between the two prey types, this further supports the hypothesis that food availability was not a limiting factor during the test. Moreover, since our experiments were done under laboratory conditions, i.e., with an abundance of prey, clear and well-illuminated waters, and without competitors or predators, we provided optimal environmental conditions for efficient hunting. However, as pointed out by Purser & Radford (2011), it is expected that the presence of noise in the natural environment would have a greater impact on the species. For example, turbidity would affect hunting success since winter flounders are visual feeders, and the presence of predators would influence the foraging efficiency of larvae since distraction induced by boat noise may increase the risk of predation. Such hypotheses have been validated by Simpson et al. (2016), who showed that young Ambon damselfish exposed to boat noise responded less rapidly to simulated predatory attacks and were six times less likely to be startled by an attack compared with those tested in ambient condition.

Kunc et al. (2014) exposed cuttlefish, *Sepia officinalis*, a species that does not rely on acoustic noise for communication, to noise playback of underwater engine noise from a small car ferry. Cuttlefish showed cross-modal impacts on both visual and tactile sensory modalities (Vermeij 2010; Kunc et al. 2014). The authors suggested that noise interference

to one sort of sensory channel can affect performance in other sensory channels, thus considering each channel in isolation might lead to misinterpretation of the overall effect of noise pollution in the marine environment (Kunc et al. 2014). Chan et al. (2010) also confirmed that multi-modal distraction reduces attention to biologically important tasks in the Caribbean hermit crab, *Coenobita clypeatus*. Such observations could be a result of the way sound propagates in water, since underwater acoustic stimuli consist of particle motion as well as sound pressure, both of which can provide information to individuals (Radford et al. 2014). Even if winter flounder larvae are considered to be visual feeders, the hypothesis of cross-modal impacts cannot be rejected.

Noise may also have detrimental effects at the physiological level, especially in the pre-metamorphosis stage. For example, seismic airgun sounds induce malformation and developmental delays in larvae of New Zealand scallop, *Pecten novaezelandiae* (Aguilar de Soto et al. 2013). Although one should be very careful when interpreting such results in the context of other species, and a comparative assessment on flatfish larvae would be necessary before strong conclusions can be drawn, the potential analogous effect on fish cannot be ignored. Larval fitness is another aspect that should be assessed. It has been shown by Purser et al. (2016) that noise effects are condition-dependent in European eels, *Anguilla anguilla*, and there is always the probability that same is true in other taxa.

1.7 CONCLUSION

Our study demonstrated that boat noise negatively affected the feeding behaviour of winter flounder larvae. There was a significant reduction in hunting attempts in the presence of boat noise, and stomach size was reduced when boat noise was present. This supports the hypothesis of lower feeding success in the presence of anthropogenic noise. Anthropogenic noise not only affects larval feeding performance, but observations also suggest a modification in swimming patterns. Additional analyses focusing on the swimming characteristics with the aim of quantifying the swimming velocity could help to further

enlighten our understanding of the impact of anthropogenic noise on marine vertebrates and more specifically on the larvae of flatfish species.

DISCUSSION GÉNÉRALE

Pour conclure, les travaux présentés dans ce mémoire montrent que l'effet du son de bateau a un impact négatif sur le comportement alimentaire des larves de plie rouge. Les individus se nourrissent moins en présence de bruit et les mesures morphométriques prises sur les estomacs corroborent ce résultat. Afin d'éviter la redondance, cette discussion générale ne reprend pas les points déjà abordés dans la discussion du manuscrit présenté au chapitre 1, mais aborde des aspects complémentaires permettant d'approfondir la compréhension des résultats obtenus.

Un des éléments pris en compte pendant les observations est le mouvement de chaque individu. Suivre les comportements de nage fournit des informations directes sur l'alimentation. Au cours du visionnement des vidéos, on a déterminé le budget-temps (%) alloué à la nage et au repos. On a constaté que les larves issues du traitement « son » avaient tendance à nager un peu moins, bien que la différence ne soit pas significative. Cependant, au cours des observations, une différence dans les patrons de nage a été notée entre les traitements. En effet, en absence de son, les larves semblaient nager plus vite et de façon uniforme alors qu'en présence de son, les mouvements étaient saccadés. Les larves avaient tendance à bouger un peu sur place, puis à se déplacer rapidement dans une direction, pour ensuite changer de direction en nageant très rapidement. Ces observations n'ont malheureusement pu être quantifiées avec la méthode d'analyse choisie.

Les recherches menées sur la nage chez d'autres espèces indiquent que de tels comportements ont été observés en présence de bruit anthropique. Notamment, Sarà et al. (2007), ont constaté que chez le thon rouge *Thunnus thynnus*, le son de bateau induit des changements dans la direction de nage ainsi qu'une augmentation de mouvements verticaux dans la colonne d'eau. De plus, l'ensemble du banc exhibe une structure non coordonnée

comparativement à des bancs observés en absence de bruit alors que les individus sont concentrés et nagent de façon unidirectionnelle (Sarà et al. 2007). En résumé, cette étude a démontré que le bruit de bateau influence significativement la nage ainsi que le positionnement spatial et la structure de groupe chez le thon rouge. Cependant, dans notre cas, seule l'influence sur la nage a pu être observée et non le positionnement spatial, car la prise de vidéo était faite d'au-dessus et il y avait très peu de profondeur d'eau dans les aquariums. Des augmentations de vitesse de nage avec changement abrupt de direction ont été décrites par Pitcher & Parrish (1993) comme étant associées à une réponse à des stimuli externes par exemple la menace associée à une rencontre avec un prédateur.

Jacobsen et al. (2014) ont testé l'effet des activités récréatives et de la pêche sportive sur la vitesse de nage de trois espèces de poisson d'eau douce : le gardon, *Rutilus rutilus*, la perche commune *Perca fluviatilis* et le brochet *Esox lucius*. Bien qu'ils n'aient pas observé d'effets chez le brochet, ils ont constaté une augmentation élevée de la vitesse de nage chez le gardon, ainsi que chez la perche bien que l'amplitude ait été moindre. Par ailleurs, Picciulin et al. (2010) ont aussi mis de l'avant l'apparition de nouveaux comportements chez des poissons exposés à des bruits de bateaux, dont la réaction d'effarouchement décrite par Boussard (1981) où l'individu fait une flexion abrupte avec son corps suivie par quelques secondes de nage très rapide.

Il serait donc potentiellement intéressant d'approfondir l'analyse des mouvements des larves de plie rouge exposées au bruit en mesurant de façon plus spécifique la vitesse ou encore la trajectoire de nage. Malheureusement, l'outil informatique d'analyse de vidéo que nous avons à notre disposition ne permettait pas de faire de telles mesures. Les vidéos sont toutefois toujours disponibles pour une analyse ultérieure.

On peut se demander si l'effet du son sur l'alimentation larvaire peut être indicateur d'effets sur des stades plus âgés. La phase larvaire qui est achevée par la métamorphose, entraîne des changements majeurs chez la plie rouge (Chambers & Leggett 1987; Ben Khemis et al. 2003). Les individus subissent une transformation morphologique et physiologique, afin de passer de la phase pélagique à la phase benthique (Pereira et al. 1999;

Montgolfier et al. 2005; Geffen et al. 2007). Il s'agit non seulement de la migration de l'œil gauche vers la droite et un changement d'orientation du corps de 90°, mais aussi de modifications majeures au niveau des organes internes (Montgolfier et al. 2005; Geffen et al. 2007). Ces transformations et le changement de l'habitat induisent une altération du régime alimentaire. À ce stade, l'alimentation des juvéniles se tourne vers des polychètes, des œufs et des invertébrés qui se trouvent sur le substrat (Pereira et al. 1999). Avec cette dissimilitude de proies, de mode d'alimentation et d'habitat et dû au fait que la propagation du son dans la colonne d'eau et à la surface du sédiment ne soit pas la même, on peut se demander si le son aurait un même effet chez les juvéniles que chez les larves. Par contre, même si la perception est différente, les juvéniles sont susceptibles d'utiliser des habitats où la présence d'activités humaines est très importante. En effet, Fairchild et al. (2005) ont démontré que les milieux estuariens sont les plus favorables pour le développement des juvéniles. Il y aurait donc intérêt à étudier l'effet du son sur le comportement alimentaire des juvéniles. Le même type de montage expérimental pourrait être utilisé, mais il ne faudrait pas oublier prendre en compte les défis posés par l'utilisation des aquariums de petite taille et les possibles effets d'écho qui pourraient se produire.

Il faut également noter que nous aurions aimé pouvoir réaliser les expériences en période de transformation de larve pélagique à juvénile benthique dans le cadre de ce projet de maîtrise. Malheureusement, l'année où j'ai réalisé les expériences, les taux de mortalité en fin de période larvaire ont été très élevés et nous avons dû abandonner cette idée. On se questionne également sur l'effet potentiel du son sur les proies elles-mêmes et une étude incluant les effets sur le comportement des proies naturelles, par ex. les copépodes, et des relations prédateur-proie, serait certainement d'intérêt. Des effets combinés pourraient en effet avoir plus d'impact que des effets isolés soit sur le prédateur, soit sur les proies.

CONCLUSION GÉNÉRALE

On peut affirmer que ce travail présente un intérêt scientifique réel dans un domaine de recherche émergent qui vise à mieux comprendre l'impact de l'activité humaine sur les espèces aquatiques. Toutes les informations scientifiques qui sont obtenues en lien avec l'effet du son de bateau sur le comportement alimentaire aideront à la réflexion qui éventuellement devrait mener à des réglementations protégeant l'intégrité de certains habitats en y incluant l'aspect sonore. De plus, à notre connaissance, cette étude est la première à être menée sur une espèce de poisson plat. À noter qu'il serait intéressant d'approfondir l'étude de l'effet du son non seulement sur les comportements de nage au stade larvaire, mais également de poursuivre des études sur les juvéniles qui sont benthiques et plus sédentaires. Tester l'effet de son sur les relations prédateur-proie est également un aspect important à étudier dans le futur pour mieux comprendre l'ensemble des impacts potentiels du son en milieu naturel.

Pour conclure, d'autres données sur l'aspect physiologique des individus exposés au son peuvent être recueillies tant en nature qu'au cours d'expériences réalisées en laboratoire, ce qui permettra d'accroître notre compréhension de cet enjeu environnemental. Finalement, approfondir notre connaissance de l'appareil auditif de la plie rouge serait également utile pour mieux comprendre la perception de bruit anthropique chez cette espèce et ses effets potentiels.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aguilar de Soto, N., Delorme, N., Atkins, J., Howard, S., Williams, J. & Jonson, M., 2013. Anthropogenic noise causes body malformations and delays development in marine larvae. *Scientific Reports*, 3, p. 2831.
- Ben Khemis, I., Audet C., Fournier, R. & De La Nöue, J., 2003. Early weaning of winter flounder (*Pseudopleuronectes americanus* Walbaum) larvae on a commercial microencapsulated diet. *Aquaculture Research*, 34(6), pp. 445–452.
- Ben Khemis, I., De la Noue, J. & Audet, C., 2000. Feeding larvae of winter flounder *Pseudopleuronectes americanus* (Walbaum) with live prey or microencapsulated diet: linear growth and protein, RNA and DNA content. *Aquaculture Research*, 31(4), pp. 377–386.
- Bigelow, H.B. & Schroeder, W.C., 1953. Fishes of the Gulf of Maine, Washington, DC: US Government Printing Office.
- Boussard, A., 1981. The reactions of roach (*Rutilus rutilus*) and rudd (*Scardinius erythrophthalmus*) to noises produced by high high speed boating. *British Freshwater Fisheries Conference Proceedings 2*, pp. 188–200.
- Buckley, L.J., 1982. Effects of temperature on growth and biochemical composition of larval winter flounder *Pseudopleuronectes americanus*. *Marine Ecology Progress Series*, 8(2), pp. 181–186.
- Chambers, R.C. & Leggett, W.C., 1987. Size and age at metamorphosis in marine fishes: an analysis of laboratory-reared winter flounder (*Pseudopleuronectes americanus*) with a review of variation in other species. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 44(11), pp.1936–1947.
- Chambers, R.C., Witting, D.A. & Lewis, S.J., 2001. Detecting critical periods in larval flatfish populations. *Journal of Sea Research*, 45(3–4), pp.231–242.
- Chan, A., Giraldo-Perez, P., Smith, S. & Blumstein, D., 2010. Anthropogenic noise affects risk assessment and attention: the distracted prey hypothesis. *Biology Letters*, 6(4), pp. 458–461.
- Duman, J.G. & Devries, A.L., 1974. Freezing resistance in winter flounder

Pseudopleuronectes americanus. *Nature*, 247(5438), pp. 237–238.

- Fairchild, E., Fleck, J. & Howell, W.H., 2005. Determining an optimal release site for juvenile winter flounder *Pseudopleuronectes americanus* (Walbaum) in the Great Bay Estuary, NH, USA. *Aquaculture Research*, 36(14), pp. 1374–1383.
- Fletcher, G.L., 1977. Circannual cycles of blood plasma freezing point and Na⁺ and Cl⁻ concentrations in Newfoundland winter flounder (*Pseudopleuronectes americanus*): correlation with water temperature and photoperiod. *Canadian Journal of Zoology*, 55(5), pp. 789–95.
- Fraboulet, E., 2009. Évaluation de la contribution paternelle et des effets de la photopériode sur les performances des croissances des jeunes stades de la plie rouge (*Pseudopleuronectes americanus*) d'origines différentes. Thèse de doctorat, Université du Québec à Rimouski, Qué., Canada.
- Geffen, A.J., Van der Veer, H.W. & Nash, R.D.M., 2007. The cost of metamorphosis in flatfishes. *Journal of Sea Research*, 58(1), pp. 35–45.
- Gervaise, C., Simard, Y., Roy N., Kinda, B. & Ménard, N., 2012. Shipping noise in whale habitat: Characteristics, sources, budget, and impact on belugas in Saguenay–St. Lawrence Marine Park hub. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 132(1), pp. 76–89.
- Götz, T., Hastie, G., Hatch, L., Raustein, O., Southall, B., Tasker, M., Thomsen, F., Campbell, J. & Fredheim, B., 2009. Overview of the impacts of anthropogenic underwater sound in the marine environment. *OSPAR Biodiversity Series*, 441, pp. 1–134.
- Hansen, B., Bjørnsen, P.K. & Hansen, P.J., 1994. The size ratio between planktonic predators and their prey. *Limnology and Oceanography*, 39(2), pp. 395–403.
- Hawkins, A.D. & Popper, A.N., 2017. A sound approach to assessing the impact of underwater noise on marine fishes and invertebrates. *ICES Journal of Marine Science*, 74(3), pp. 635–651.
- Heinle, D.R. & Flemer, D.A., 1975. Carbon requirements of a population of the estuarine copepod *Eurytemora affinis*. *Marine Biology*, 31(3), pp. 235–247.
- Holles, S., Simpson, S., Radford, A., Berten, L. & Lecchini, D., 2013. Boat noise disrupts orientation behaviour in a coral reef fish. *Marine Ecology Progress Series*, 485, pp. 295–300.

- 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), pp. 1768–1780.
- Jolivet, A., Tremblay, R., Olivier, F., Gervais, C., Sonier, R., Genard, B. & Chauvaud, L., 2016. Validation of trophic and anthropic underwater noise as settlement trigger in blue mussels. *Scientific Reports*, 6. p. 33829
- Kennedy, V. & Steele, D., 1971. The winter flounder (*Pseudopleuronectes americanus*) in Long Pond, Conception Bay, Newfoundland. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 28(8), pp. 1153–1165.
- Klein-MacPhee, G., 1978. Synopsis of biological data for the winter flounder, *Pseudopleuronectes americanus* (Walbaum). NOAA Technical Report NMFS Circular 414, p. 43
- Kunc, H.P., Lyons, G., Sigwart, J., McLaughlin, K. & Houghton, J., 2014. Anthropogenic noise affects behavior across sensory modalities. *The American Naturalist*, 184(4), pp. E93–E100.
- La Manna, G. et al., 2016. Behavioral response of brown meagre (*Sciaena umbra*) to boat noise. *Marine Pollution Bulletin*, 110(1), pp.324–334.
- Laurence, G.C., 1977. A bioenergetic model for the analysis of feeding and survival potential of winter flounder, *Pseudopleuronectes americanus*, larvae during the period from hatching to metamorphosis. *Fishery Bulletin*, 75(3), pp. 529–546.
- Licois, A., 2006. L'effet de la turbidité sur l'alimentation des juvéniles de plie rouge (*Pseudopleuronectes americanus*) au début de la phase benthique. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, Qué., Canada.
- Link, J.S., Bolles, K. & Milliken, C.G., 2002. The feeding ecology of flatfish in the Northwest Atlantic. *Journal of Northwest Atlantic Fishery Science*, 30 (December), pp. 1–17.
- Litvak, M.K., 1999. The development of winter flounder (*Pleuronectes americanus*) for aquaculture in Atlantic Canada: Current status and future prospects. *Aquaculture*, 176(1–2), pp. 55–64.
- Luo, J., Siemers, B.M. & Koselj, K., 2015. How anthropogenic noise affects foraging. *Global Change Biology*, 21(9), pp. 3278–3289.
- McCracken, F.D., 1963. Seasonal movements of the winter flounder, *Pseudopleuronectes*

- americanus* (Walbaum), on the Atlantic coast. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 20(2), pp. 551–586.
- Ministère Pêche et Océans Canada (MPO), 2002. Plie rouge du sud du golfe du Saint-Laurent (div.4T).
- Montgolfier, B., Audet, C. & Lambert, Y., 2005. Growth of early juvenile winter flounder (*Pseudopleuronectes americanus* Walbaum). *Aquaculture Research*, 36(16), pp. 1595–1601.
- Montgomery, J.C., Jeffs, A., Simpson, S., Meekan, M. & Tindle, C., 2006. Sound as an orientation cue for the pelagic larvae of reef fishes and decapod crustaceans. *Advances in Marine Biology*, 51, pp. 143–196.
- Nedelec, S.L. et al., 2015. Impacts of regular and random noise on the behaviour, growth and development of larval Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Proc. R. Soc. B*, 282(1817). p. 20151943
- Olla, B.L., Wicklund, R. & Wilk, S., 1969. Behavior of winter flounder in a natural habitat. *Transactions of the American Fisheries Society*, 98(2), pp.717–720.
- Pereira, J.J., Goldberg, R., Ziskowski, J., Berrien, P., Morse, W. & Johnson, D., 1999. Essential fish habitat source document: Winter flounder, *Pseudopleuronectes americanus*, life history and habitat characteristics. NOAA Tech Mem NMFS-NE-138 National Marine Fisheries Services, Wood Hole, Massachusetts, p. 39
- Picciulin, M., Sebastianutto, L., Codarin, A., Farina, A. & Ferrero, E., 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(1–2), pp. 125–132.
- Pine, M.K., Jeffs, A.G. & Radford, C.A., 2012. Turbine sound may influence the metamorphosis behaviour of estuarine crab megalopae. *PLoS ONE*, 7(12).
- Pitcher, T. & Parrish, J., 1993. Functions of shoaling behaviour in teleosts. *Behaviour of Teleost Fishes*, pp. 294–337. Springer US.
- Popper, A. & Hastings, M., 2009. The effects of anthropogenic sources of sound on fishes. *Journal of Fish Biology*, 75(3), pp. 455–489.
- Popper, A. & Hastings, M., 2009. The effects of human-generated sound on fish. *Integrative Zoology*, 4(1), pp. 43–52.

- Popper, A.N., Hawkins, A., Fay, R., Mann, D., Bartol, S., Carlson, T., Coombs, S., Ellison, W., Gentry, R., Halvorsen, M., Lokkeborg, S., Roger, P., Southall, B., Zeddies, D. & Tavolga, W., 2014. *ASA S3/SC1. 4 TR-2014 Sound exposure guidelines for fishes and sea turtles: A technical report prepared by ANSI-Accredited standards committee S3/SC1 and registered with ANSI.* Springer.
- Purser, J., Bruintjes, R., Simpson, S. & Radford, A., 2016. Condition-dependent physiological and behavioural responses to anthropogenic noise. *Physiology and Behavior*, 155(March), pp.157–161.
- 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), p. 17478
- 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), pp. 1022–1030.
- Sarà, G., Dean, J., D'Amato, D., Buscaino, G., Oliveri, A., Genovese, S., Ferro, S., Buffa, G., Lo Martire, M. & Mazzola, S., 2007. Effect of boat noise on the behaviour of bluefin tuna *Thunnus thynnus* in the Mediterranean Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 331(February), pp. 243–253.
- Scott, W.B. & Scott, M.G., 1988. Atlantic fishes of Canada Canadian Bulletin of Fisheries and Aquatic Science, 219.
- Simpson, S.D., Radford, A., Nedelec, S., Ferrari, M., Chivers, D., McCormick, M & Meekan, M., 2016. Anthropogenic noise increases fish mortality by predation. *Nature Communications*, 7, p. 10544
- Slabbekoorn, H., Bouton, N., Van Opzeeland, I., Coers, A., Ten Cate, C & Popper A., 2010. A noisy spring: the impact of globally rising underwater sound levels on fish. *Trends in Ecology and Evolution*, 25(7), pp. 419–427.
- Southall, B., Bowles A., Ellison, W., Finneran, J., Gentry, R., Greene, C., Kastak, D., Ketten, D., Miller, J., Nachtigall, P., Richardson, W., Thomas, J & Tyack, P., 2007. Marine mammal noise-exposure criteria: initial scientific recommendations. *Aquatic Mammals*, 33(4), pp. 411–521.
- Stanley, J.A., Radford, C.A. & Jeffs, A.G., 2010. Induction of settlement in crab megalopae by ambient underwater reef sound. *Behavioral Ecology*, 21(1), pp. 113–120.
- Sullivan, W.E., 1915. A description of the young stages of the winter flounder.

Transactions of the American Fisheries Society, 44(2), pp.125–136.

- Tyler, A. V., 1971. Surges of winter flounder, *Pseudopleuronectes americanus*, into the intertidal zone. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 28(11), pp. 1727–1732.
- Vagner, M., de Montgolfier, B., Sévigny, J.-M., Tremblay, R. & Audet, C., 2013. Expression of genes involved in key metabolic processes during winter flounder (*Pseudopleuronectes americanus*) metamorphosis. *Canadian Journal of Zoology* 91(1), pp. 156–163.
- Vaillacourt, R., 2008. Contribution à l'optimisation des conditions d'élevage du stade larvaire de la plie rouge (*Pseudopleuronectes americanus*). Thèse de doctorat, Université du Québec à Rimouski, Qué., Canada.
- Vaillancourt, R., 1982. Contribution à l'étude biologique de la population de plies rouges, *Pseudopleuronectes americanus* (Walbaum), de la région de St-Fabien-sur-mer, Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, Qué., Canada.
- Vaillancourt, R., Bréthes, J.-C. & Desrosiers, G., 1985. Croissance de la plie rouge (*Pseudopleuronectes americanus*) de l'estuaire maritime du Saint-Laurent. *Canadian Journal of Zoology*, 63(7), pp. 1610–1616.
- Van Guelpen, L. & Davis, C.C., 1979. Seasonal movements of the winter flounder, *Pseudopleuronectes americanus*, in two contrasting inshore locations in Newfoundland. *Transactions of the American Fisheries Society*, 108(1), pp. 26–37.
- Vermeij, G.J., 2010. Sound reasons for silence: Why do molluscs not communicate acoustically? *Biological Journal of the Linnean Society*, 100(3), pp. 485–493.
- Voellmy, I., Pursur, J., Flynn, D., Kennedy, P., Simpson, S. & Radford, A., 2014. Acoustic noise reduces foraging success in two sympatric fish species via different mechanisms. *Animal Behaviour*, 89(March), pp. 191–198.
- Wenz, G.M., 1962. Acoustic ambient noise in the ocean: Spectra and sources. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34(12), pp. 1936–1956.
- Yamashita, Y., Tanaka, M. & Miller, J.M., 2001. Ecophysiology of juvenile flatfish in nursery grounds. *Journal of Sea Research*, 45(3–4), pp. 205–218.

