



Université du Québec
à Rimouski

**Comportement et capacité d'enfouissement des plies juvéniles
(*Pseudopleuronectes americanus*) selon la salinité, le sédiment et
la vitesse de courant**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en océanographie

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

PAR

© **PROVENCHER TAMARA**

Octobre 2017

Composition du jury :

Dominique Robert, 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

**Frédéric Olivier, codirecteur de recherche, Muséum National d'Histoire Naturelle,
Paris, France**

Olivier Le Pape, Agrocampus Ouest, Pôle halieutique, mer et littoral, Rennes

Dépôt initial le 27 avril 2017

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.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier ma directrice de recherche Céline Audet, Ph. D. (Institut des sciences de la mer de Rimouski, ISMER) ainsi que mes codirecteurs Réjean Tremblay, Ph. D. (Institut des sciences de la mer de Rimouski, ISMER) et Frédéric Olivier, Ph. D. (Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris). J'ai découvert une passion pour l'aquaculture pendant mon baccalauréat en génie agricole et je suis entrée à la maîtrise avec peu de connaissances dans le domaine aquacole, et pratiquement aucune en biologie. Ces trois personnes ont pu me guider dans mon apprentissage et m'expliquer clairement des concepts jusqu'alors inconnus pour moi. Le projet qui m'a été proposé était idéal pour obtenir un diplôme de maîtrise en deux ans tout en mettant en pratique divers concepts très intéressants et applicables dans l'industrie de l'aquaculture. Grâce au soutien que j'ai eu tout au long de ma maîtrise, j'ai pu garder de la motivation et du plaisir à travailler jusqu'à la fin, et même pendant mon séjour en Chine, où je terminais la rédaction.

Je tiens à remercier spécialement Céline Audet pour m'avoir donné l'opportunité de travailler à la station aquicole de Pointe-au-Père avant le début de la maîtrise. Cette expérience de travail m'a donné de la discipline, de la rigueur et des connaissances techniques et fondamentales en aquaculture. Céline Audet est une personne très dévouée dans la formation des étudiants à sa charge. Nathalie Morin et Renée Gagné ont été des aides nécessaires pour la préparation de mon projet de maîtrise et je les remercie de leur temps et de leur patience. Je remercie aussi les stagiaires ainsi que les étudiants d'été qui ont pris soin des plies juvéniles utilisées dans mon expérience.

Merci à mes collègues de l'ISMER qui ont pu m'apporter du soutien technique, de l'aide à la rédaction ou de la présence dans mes pratiques de présentation, entre autres Mélanie Gaillard, Claude Belzile, Pascal Tremblay.

Merci à mon conjoint qui a toujours été d'un calme et d'une empathie extraordinaire pendant les moments plus stressants. J'espère avoir ta douceur et ton écoute lorsque tu seras dans des moments « chauds » de ton doctorat. Merci à mes parents pour m'avoir donné l'amour des poissons et de la pêche récréative et bien sûr un support financier pendant tout mon parcours scolaire. Mes parents ont été présents (et ont fait beaucoup de route) lors de ma présentation d'affiche au RAQ en 2015 et lors de ma présentation finale de maîtrise en 2016.

Ce travail a été réalisé grâce aux contributions financières du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), ainsi que du regroupement Ressources Aquatiques Québec (RAQ).

AVANT-PROPOS

Cet article, « *Effect of sediment, salinity and shear velocity on behavior of juvenile winter flounder* », fut corédigé par moi-même ainsi que par Céline Audet, Réjean Tremblay et Frédéric Olivier. Il a été soumis pour publication dans la revue *Environmental Biology of Fishes*. J'ai contribué à la revue de littérature, la préparation de l'expérience scientifique, la collecte de données, les tests statistiques et la rédaction. Les trois auteurs ont participé activement à la supervision de toutes les étapes, ainsi qu'à la rédaction.

RÉSUMÉ

La plie rouge (*Pseudopleuronectes americanus*) est un poisson plat benthique important en Amérique du Nord pour la pêche récréative et commerciale, mais les populations connaissent un déclin drastique dû à plusieurs facteurs anthropiques. Afin d'y remédier, l'aquaculture de juvéniles de plie rouge est utilisée pour le réensemencement aux États-Unis, malgré la survie très faible des juvéniles en milieu naturel. Cette étude vise à élucider certains aspects du comportement et de la sélection d'habitats favorables à la survie des juvéniles pour améliorer la gestion des populations sauvages et optimiser les conditions de réensemencement. Trois facteurs abiotiques influençant la distribution des poissons plats ont été testés dans un canal hydrodynamique sur des juvéniles de plie rouge de deux ans, soient le sédiment, le courant et la salinité. Les budgets-temps des comportements d'enfouissement, de nage, et d'orientation par rapport au courant ont été analysés. Les résultats obtenus démontrent que le sédiment est le seul facteur ayant un effet sur l'enfouissement des juvéniles de plie rouge. Aucun effet de la vitesse de cisaillement ni de la salinité n'a été détecté.

Mots clés : plie rouge, courant, sédiment, salinité

ABSTRACT

Winter flounder (*Pseudopleuronectes americanus*) is a benthic flatfish that is economically important for recreational and commercial fishing in North America. In the last twenty years, the species has undergone a drastic decline, mainly due to anthropic influence. The goal of this study is to gain knowledge on habitat preferences and behavior of juvenile winter flounder to improve the management of natural stocks and optimize release sites of juveniles produced for stock enhancement. Three abiotic factors potentially influencing the distribution of flatfish species were tested in a flume for juvenile winter flounder; these were sediment, current, and salinity. Time budgets of observed behaviors including swimming, orientation, and burying capacity were analyzed. Our results showed that sediment texture was the only factor that significantly influenced the burying behavior of winter flounder juveniles. Shear velocity did not change the juvenile's orientation, nor did salinity or sediment.

Keywords: Winter flounder, sediment, salinity, current

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	v
AVANT-PROPOS	vii
RÉSUMÉ	viii
ABSTRACT	ix
TABLE DES MATIÈRES	x
LISTE DES TABLEAUX	xiii
LISTE DES FIGURES	xiv
LISTE DES ANNEXES	xv
LISTE DES SYMBOLES	xvii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	18
CONTEXTE	18
EFFETS DES FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX SUR LES PATRONS DE DISTRIBUTION DE LA PLIE ROUGE EN MILIEU NATUREL	19
EFFET DES FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX SUR LE COMPORTEMENT DE D' AUTRES ESPECES DE POISSONS PLATS	21
OBJECTIFS	24
HYPOTHESES	24
Effect of sediment, salinity and shear velocity on behavior of juvenile winter flounder	26
1.1 RESUME EN FRANÇAIS DU CHAPITRE 1	26
1.2 EFFECT OF SEDIMENT, SALINITY AND SHEAR VELOCITY ON BEHAVIOR OF JUVENILE WINTER FLOUNDER	26

1.3 MATERIAL AND METHODS	28
1.3.1 Juvenile hatchery conditions.....	28
1.3.2 Flume experiments.....	29
1.3.3 Behavioral variables	32
1.3.4 Statistical analyses	32
1.4 RESULTS.....	33
1.4 DISCUSSION	38
1.4.1 Swimming behavior.....	38
1.4.2 Effects of sediment and salinity on juvenile flounder behaviour	41
1.4.3 Orientation	41
1.5 CONCLUSION	42
DISCUSSION GÉNÉRALE	43
RETOUR SUR LE MODE DE RESISTANCE AU COURANT DE LA PLIE ROUGE JUVENILE	43
RHEOTAXIE ET MIGRATION.....	44
COMPARAISON AVEC D’AUTRES ESPECES	45
DEGRES DE LIBERTE	46
LUMINOSITE	46
ÉTAT PHYSIOLOGIQUE.....	46
PERSPECTIVES	47
SEDIMENT DANS LES BASSINS D’ELEVAGE.....	49
CONCLUSION	50
ANNEXES	52
ANALYSE NON PARAMETRIQUE DES TYPES DE NAGE	52
VITESSE DE CISAILLEMENT.....	65
Calcul de la vitesse de cisaillement en milieu naturel	66
Équation de Von Karman-Prandtl.....	67

POSITION DES PLIES DANS LA ZONE EXPERIMENTALE 67

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : ANOVA table for 8 behaviors tested (A, B, C, D, E, F, G and H)**Erreur ! Signet non défini.**0

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Experimental design for increase of shear stress according to time for the treatments 'sand' and 'gravel'	35
Figure 2: Time budget for the behaviors 'not buried', '25%-75% buried' and '100% buried', chosen at current speed 20-30 cm s ⁻¹	42
Figure 3: Current speed and sediment effects (current speed x sediment interaction, p≤0.05) on time budget for juveniles that spent time outside of the experimental zone.	43

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : ANOVA de Friedman pour le type de nage « dérive passive », testé pour les facteurs « salinité 15 et sable ».....	57
Annexe 2: ANOVA de Friedman pour le type de nage « dérive passive », testé pour les facteurs « salinité 15 et gravier ».....	58
Annexe 3 : ANOVA de Friedman pour le type de nage « dérive passive », testé pour les facteurs « salinité 35 et sable ».....	59
Annexe 4 : ANOVA de Friedman pour le type de nage « dérive passive », testé pour les facteurs « salinité 35 et gravier ».....	60
Annexe 5 : ANOVA de Friedman pour le type de nage « perte de contrôle », testé pour les facteurs « salinité 15 et sable ».....	61
Annexe 6 : ANOVA de Friedman pour le type de nage « perte de contrôle », testé pour les facteurs « salinité 15 et gravier ».....	62
Annexe 7: ANOVA de Friedman pour le type de nage « perte de contrôle », testé pour les facteurs « salinité 35 et sable ».....	63

Annexe 8 : ANOVA de Friedman pour le Type de nage « perte de contrôle », testé pour les facteurs « salinité 35 et gravier ».....	64
Annexe 9 : ANOVA de Friedman pour le Type de nage « ras au sol », testé pour les facteurs « salinité 15 et sable ».....	65
Annexe 10 : ANOVA de Friedman pour le type de nage « ras au sol », testé pour les facteurs « salinité 15 et gravier ».....	66
Annexe 11 : ANOVA de Friedman pour le type de nage « ras au sol », testé pour les facteurs « salinité 35 et sable ».....	67
Annexe 12 : ANOVA de Friedman pour le type de nage « ras au sol», testé pour les facteurs « salinité 35 et gravier »	68
Annexe 13 : estimation de la vitesse de cisaillement (cm/s) avec la formule Von Karman-Prandtl selon les deux sédiments et la vitesse de courant à $z = 5$ cm.....	70
Annexe 14 : Table de PERMANOVA des budgets-temps selon la position dans la zone expérimentale.....	72

LISTE DES SYMBOLES

SYMBOLE u^* La vitesse de cisaillement

SYMBOLE U_z Vitesse U mesurée à la profondeur z.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

CONTEXTE

La plie rouge est une espèce importante pour la pêche commerciale et une possible diversification de l'aquaculture sur la côte est de l'Amérique du Nord (e.g. Audet et Tremblay 2011). Cette espèce est très populaire pour la pêche récréative au Québec ainsi qu'ailleurs en Amérique du Nord, particulièrement en milieux côtiers peu profonds (< 100 m (Fisheries and Oceans Canada, 2012)). De plus, sa chair ferme et blanche est d'excellente qualité pour la consommation humaine (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2009). La plie rouge, que l'on retrouve au large des côtes du New-Hampshire jusqu'à Terre-Neuve, est à la fois euryhaline et eurytherme, ce qui lui permet de coloniser des environnements aux gradients thermo-halins très marqués, tel l'estuaire du Saint-Laurent (Fisheries and Oceans Canada, 2012) où elle est présente toute l'année.

L'habitat estuarien de la plie rouge est cependant affecté par plusieurs facteurs anthropiques incluant l'urbanisation, la transformation des zones estuariennes pour les besoins récréatifs et la pêche. Sur la Côte Est des États-Unis, la surpêche est une des causes majeures de la diminution drastique des populations de plie rouge. Les relevés de Pêches et Océans indiquent une baisse de l'abondance depuis les années 80, ce qui suggère que l'augmentation des stocks de plie rouge à court terme est improbable en raison des observations annuelles de baisse de la taille en fonction de l'âge et de mortalité naturelle élevée (prédation).

Afin de remédier à la régression des populations de plie rouge, une recherche sur l'exploitation aquicole de juvéniles de plie rouge à des fins d'ensemencement en soutien à la pêche commerciale est réalisée sur la Côte Est des États-Unis (Fairchild 2013; Fishwatch 2014). Cependant, le taux de survie des juvéniles nés en captivité et ensemencés est très faible, notamment à cause d'une mauvaise capacité d'enfouissement dans les sédiments naturels (Fairchild et Howell, 2004). Au Japon, Tanda (1990) indique que les causes du

faible taux de survie des juvéniles ensemencés de la plie japonaise (*Paralichthys olivaceus*) sont encore méconnues et nécessitent l'acquisition de nouvelles connaissances fondamentales à ce stade de vie.

Il faut noter que chez la plie rouge, la plupart des études portent sur les juvéniles de moins d'un an (0+) ou sur les adultes, avec comme résultat un manque important de connaissances sur la biologie du stade juvénile. Aussi, les connaissances actuelles ne permettent pas de localiser les pouponnières de juvéniles dans l'estuaire du Saint-Laurent. Dans ce contexte, la compréhension des mécanismes de sélectivité des habitats favorables à la survie des juvéniles de plie rouge est un préalable à toute gestion des populations naturelles, notamment en précisant les critères de choix des lieux d'ensemencement de juvéniles et en améliorant leurs conditions d'élevage.

EFFETS DES FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX SUR LES PATRONS DE DISTRIBUTION DE LA PLIE ROUGE EN MILIEU NATUREL

La plupart des poissons plats s'enfouissent en battant vigoureusement la tête contre le sédiment avec une vague de contraction musculaire sur toute la longueur du corps (e.g. Gibson et al. 2005). Les habitats préférentiels des poissons plats dépendent du type de substrat permettant l'enfouissement mais aussi de plusieurs autres facteurs abiotiques comme l'hydrodynamisme, la salinité, la température, l'oxygène dissous, et de facteurs biotiques, comme la présence de prédateurs et de leurs proies benthiques (e.g. Gibson et al. 2005).

La plie rouge peut s'enfouir dans le substrat et imiter la couleur du sédiment. Après la métamorphose, les poissons plats possèdent une flottabilité négative, mais peuvent facilement nager dans la colonne d'eau (e.g. Gibson et al. 2005). Le fait que des juvéniles de moins d'un an choisissent des habitats très variés laisse supposer qu'ils ne sont pas très

sélectifs (Able et Fahay 1998). Cependant, selon Fairchild et al. (2005), l'abondance de plie rouge juvénile de moins d'un an au New Hampshire serait corrélée avec la nature du sédiment et il n'y aurait pas d'influence de la salinité, de la température de l'eau, de la turbidité, de la profondeur ou de la présence d'herbiers et d'algues. Ces auteurs ont observé des densités maximales sur des sédiments hétérogènes envasés (coquilles mortes) et minimales sur des sables. L'étude expérimentale de Joly (2004) sur la croissance et la survie de juvéniles 0+ en fonction de deux types de sédiments (argile et sable fin) a démontré que la nature du sédiment n'influencerait ni la croissance ni la condition générale des individus.

L'habitat préférentiel de la plie rouge semble varier avec la taille des animaux. Ainsi, les juvéniles de plie rouge de plus grande taille (50-95mm) sélectionneraient un substrat sablonneux (Phelan et al. 2001). Cependant, la présence de proies peut modifier cette sélectivité et ainsi attirer les juvéniles vers un substrat défavorable tel qu'un substrat graveleux (Gibson et Robb 1992; Gibson 1994; Phelan et al. 2001; Fairchild et Howell 2004). La présence de structures complexes en trois dimensions (Fairchild et al. 2005), comme les macroalgues (Stoner et al. 2001), et les galets (Pappal et al. 2009) peut aussi influencer l'enfouissement. Une densité spatiale accrue de juvéniles de plie rouge de moins d'un an a été trouvée dans les zones de zostère marine adjacentes aux zones sablonneuses de deux estuaires du Maine (Lazzari 2015) et la survie des juvéniles semble augmenter dans les zones d'herbiers à zostère marine (Heck et al. 1989; Manderson et al. 2000). Aussi, Pappal et al. ont démontré que la plie rouge juvénile sauvage de moins d'un an préfère les interstices entre des galets, plutôt qu'un sédiment de sable ou de pierres sans espaces assez grands pour se cacher. Ces exemples démontrent la complexité des relations entre les facteurs abiotiques ou biotiques en milieu naturel (e.g. Gibson et al. 2005).

La plie rouge, adulte et juvénile, réalise des migrations selon des cycles tidaux et saisonniers. Dans le golfe du Maine, les adultes de plie rouge localisés dans la baie de

Plymouth migrent vers des zones peu profondes de l'estuaire de Plymouth au printemps lorsque l'eau se réchauffe (DeCelles et Cadrin, 2010). Toutefois, les juvéniles ont tendance à migrer moins loin que les adultes lors des déplacements saisonniers. L'hypothèse proposée par Saucerman et Deegan (1991) serait que la plie rouge adulte est moins sensible aux variations de température comparativement aux juvéniles.

Dans la baie de Passamaquody (Nouveau-Brunswick, Canada), la plie rouge se nourrit dans la zone intertidale en suivant la marée montante (Tyler 1971), puis revient dans la zone subtidale pendant le jusant. Aussi, bien que les migrations tidales de plie rouge soient similaires entre individus de différentes tailles, la plie juvénile effectue des déplacements de plus faible amplitude (Tyler 1971). Toutefois, à notre connaissance, aucune étude spécifique sur l'orientation et le maintien de la direction de nage de la plie rouge juvénile ou adulte n'a été réalisée.

EFFET DES FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX SUR LE COMPORTEMENT DE D'AUTRES ESPÈCES DE POISSONS PLATS

Les réponses comportementales aux facteurs environnementaux sont spécifiques à l'espèce. Par exemple, l'abondance de juvéniles 0+ de plie commune (*Pleuronectes platessa*) augmenterait proportionnellement avec la salinité dans un estuaire du Royaume Uni (Poxton et Nasir, 1985). Selon Wirjoatmodjo et Pitcher (1984), la salinité a peu d'impact sur la répartition des poissons qui ont une grande capacité d'osmorégulation, donnant en exemple le flet commun (*Platichthys flesus*), mais suggérant une réduction progressive de la tolérance à la salinité avec l'âge.

Comme pour la plie rouge, les différences de distribution spatiale des juvéniles par rapport aux adultes de plusieurs espèces de poissons plats auraient pour source la nature du substrat qui module la résistance à l'enfouissement des individus (Malloy et Targett 1991; Champalbert et al. 1994). Les juvéniles de « marbled sole » (*Limanda yokohamae*), de plie

commune (*Pleuronectes platessa*) et de sole commune (*Solea solea*) augmenteraient leur capacité d'enfouissement avec la taille (Tanda 1990). Ce serait également le cas pour les juvéniles de la plie commune et du turbot (*Scophthalmus maximus*) qui, lors d'expériences menées en laboratoire, sélectionnent les sédiments sablonneux (Rogers 1992; Nasir et Poxton 2001). Dans un contexte de croissance préalable à des ensemencements, une couche de sédiment dans les bassins pourrait augmenter la capacité d'enfouissement des juvéniles lors de leur transfert en milieu naturel (Ellis et al. 1997). Cependant, cette sélectivité texturale varierait selon l'espèce (Moles et Norcross 1995). En outre, les facteurs modifiant l'activité des poissons plats, tels que la lumière et les facteurs endogènes, pourraient aussi moduler la sélectivité sédimentaire (Nasir et Poxton 2001). En laboratoire, le cardeau d'été (*Paralichthys dentatus*) a une préférence pour le sable et non pour la vase, ce qui contredit les études sur le terrain (Keefe et Able 1994). Selon ces auteurs, la présence et la distribution de proies en milieu naturel pourrait expliquer cette contradiction.

Une fois les poissons enfouis, l'activité et les mouvements seraient réduits (Gibson et Robb, 1992). Ainsi, la diminution du métabolisme lors de l'enfouissement a été démontrée chez la sole (Howell et Canario 1987). En restant proche du sédiment, les poissons plats pourraient diminuer le coût énergétique du déplacement. Le comportement d'enfouissement permettrait également aux poissons plats de lutter contre la prédation et de mieux résister au courant (Tanda 1990). En effet, la forme du corps des poissons plats permet l'enfouissement dans le sédiment et procure en couche limite de fond une faible traînée et une grande portance (Arnold et Weihs 1978).

Les réponses comportementales des poissons plats face à l'écoulement incluent la dérive passive, l'orientation, l'enfouissement, la remise en suspension, etc. La rhéotaxie, orientation du corps de l'animal par rapport à un stimulus hydrodynamique, semble être liée aux migrations que certaines espèces de poissons plats réalisent (Arnold 1974). Arnold (1969), menant une expérience sur des poissons anesthésiés, a montré que les vitesses

critiques de charriage des individus placés en position rhéotaxique négative sont plus faibles. La vitesse seuil induisant la rhéotaxie varie selon les espèces. Pour la sole juvénile et la plie commune, la rhéotaxie est induite à faible vitesse d'écoulement (Arnold 1974; Champalbert et al. 1994), ce qui corrobore les observations en milieu naturel d'utilisation des courants de marées pour économiser leur énergie (Greer Walker et al. 1978). Lorsque la direction de la marée n'est pas favorable, les individus de ces deux espèces s'enfouissent afin de résister au courant (Greer Walker et al. 1978.; Domenici et Kapoor 2010). Chez la sole juvénile, des conditions de faible salinité augmentent la fréquence de position rhéotaxique. Par ailleurs, l'effet combiné de faibles salinités et des vitesses élevées d'écoulement augmente la fréquence de nage à contre-courant chez les juvéniles de sole (Champalbert et al. 1994). Selon ces auteurs, des facteurs environnementaux et endogènes influencent la migration horizontale chez cette espèce: durant le jusant, les soles s'orientent face au courant et restent au contact du substrat alors que la salinité est réduite ce qui limite toute dispersion; lors du flot, les soles dérivent passivement en couche limite benthique. La luminosité interagit avec les réponses comportementales de la sole à l'hydrodynamisme, une intensité lumineuse forte augmentant la proportion de soles juvéniles sur le sédiment en position perpendiculaire au courant (Champalbert et Marchand 1994 ; Champalbert et al. 1994).

La présente étude se penche donc sur l'effet de trois facteurs abiotiques (salinité, vitesse de cisaillement et type de sédiment) sur les comportements d'enfouissement, de nage et d'orientation de la plie rouge (*Pseudopleuronectes americanus*). La vitesse de cisaillement caractérise l'interface sédiment-eau causée par la friction du courant avec le fond de l'eau. Cette espèce nord-américaine vit dans des zones de dessalures (marées estuariennes), et s'enfouit dans le sédiment, donc ces trois facteurs abiotiques pourraient faire partie de la définition de son habitat préférentiel.

OBJECTIFS

Une meilleure gestion de la plie rouge passe par une meilleure compréhension de son comportement d'enfouissement, de nage et d'orientation, de l'interaction entre les facteurs environnementaux et la distribution spatiale et temporelle de l'espèce à tous ses stades de vie (Stoner et al. 2001). Ces connaissances de base sont essentielles pour 1) expliquer tout patron spatial ou temporel de la structure et la dynamique des populations, et 2) améliorer la gestion des populations sauvages soumises aux pressions anthropiques en ciblant des habitats naturels favorables à l'ensemencement de juvéniles.

L'objectif principal de cette étude est de comprendre les processus éco-éthologiques impliqués dans le recrutement de la plie rouge juvénile et plus spécifiquement d'estimer le poids de trois facteurs abiotiques, l'hydrodynamisme, la salinité et la texture sédimentaire dans la sédentarisation des juvéniles. Les effets indépendants et les interactions de ces trois facteurs sur le comportement (enfouissement, nage et orientation) de la plie rouge juvénile ont été testés. Deux salinités (15 et 25‰), deux types de sédiments (gravier, sable) et l'augmentation graduelle du courant jusqu'à 30 cm/s mesurée à 5 cm du fond ont été choisis. Les mesures de vitesse de courant sont exprimées en vitesse de cisaillement dans le texte.

HYPOTHÈSES

La première hypothèse testée est que les conditions d'écoulement en couche limite benthique modifient les comportements d'enfouissement et d'orientation par rapport à l'écoulement: plus la vitesse de cisaillement est élevée, plus la proportion de plies enfouies et en position rhéotaxique positive sera grande. La deuxième hypothèse testée est que les plies sont plus enfouies dans le sédiment fin comparativement au sédiment grossier. Finalement, la troisième hypothèse testée est que la salinité n'a pas d'influence sur les comportements natatoires, d'orientation par rapport au courant et d'enfouissement de la plie rouge juvénile.

EFFECT OF SEDIMENT, SALINITY AND SHEAR VELOCITY ON BEHAVIOR OF JUVENILE WINTER FLOUNDER

1.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU CHAPITRE 1

La plie rouge (*Pseudopleuronectes americanus*) est un poisson plat benthique important en Amérique du Nord pour la pêche récréative et commerciale, mais les populations connaissent un déclin drastique dû à plusieurs facteurs anthropiques. Cette étude vise à élucider certains aspects du comportement et de la sélection d'habitats favorables à la survie des juvéniles pour améliorer la gestion des populations sauvages et optimiser les conditions de réensemencement. Trois facteurs abiotiques influençant la distribution des poissons plats ont été testés dans un canal hydrodynamique sur des juvéniles de plie rouge de deux ans, soient le type de sédiment, le courant et la salinité. Les budgets-temps des comportements d'enfouissement, de nage, et d'orientation par rapport au courant ont été analysés. Les résultats obtenus démontrent que le type de sédiment est le seul facteur ayant eu un effet sur l'enfouissement des juvéniles de plie rouge. Aucun des trois facteurs (courant, salinité ou sédiment) n'a eu d'influence sur l'orientation des juvéniles.

1.2 EFFECT OF SEDIMENT, SALINITY AND SHEAR VELOCITY ON BEHAVIOR OF JUVENILE WINTER FLOUNDER

Winter flounder (*Pseudopleuronectes americanus*) is a eurythermal and euryhaline flatfish found in the shallow coastal waters of North America (Scott and Scott 1988). This species supports a commercial fishery in Canada and the United States, mainly driven by

market price (Atlantic States Marine Fisheries Commission, 2012; Fisheries and Oceans Canada, 2012). Because the American and Canadian stocks have declined since the 1980s, the conservation of their populations is a major concern on the east coast of the United States (ASFMC 2012; DFO 2012). To support sport fishing, hatchery-reared juveniles are released to stimulate the renewal and size of natural populations (Fairchild 2010). However, the survival rate of released juveniles remains low (Fairchild and Howell 2004; Fairchild 2013). The lack of natural stimuli in the hatchery environment could suppress anti-predatory behaviors or decrease the cryptic abilities when juveniles are released in the wild (Kellison et al. 2000; Fairchild and Howell 2004).

Little is known about the behavior and habitat preferences of juveniles. Young-of-the-year (0+) flounder are found over a wide range of depths and sediment types (Able and Fahay 1998), but habitat preference seems to be size dependent, as seen in both laboratory and field experiments (Phelan et al. 2001). Although it is well known that sediment texture influences the spatial distribution of juvenile winter flounder (Fairchild et al. 2005), the effects of both salinity and the benthic boundary layer flows on the behavior of juvenile fish have been poorly documented. Wirjoatmodjo and Pitcher (1984) suggested that salinity likely has a limited impact on the distribution of estuarine fish based on their adaptive osmoregulatory capacity, but the abundance of *Pleuronectes platessa* juveniles seems to be salinity dependent (Poxton and Nasir 1985). Greer Walker et al. (1978) suggested that *Limanda yokohamae* juveniles use tidal currents to preserve their energetic reserves, but the effect of currents on energy budget is not available for *P. americanus*. Juveniles and adults have been observed to undergo foraging tidal migrations (Tyler 1971), but the main mechanisms driving these migrations remain largely unknown.

The objectives of this study were to test how burying, orientation, and swimming behaviors of 2+ hatchery-reared juvenile winter flounder are influenced by sediment texture, salinity, and shear stress intensity. Our first hypothesis was that the time spent in

positive rheotaxis would increase proportionally when shear stress increases. We also hypothesized that the rate of burial would be higher in finer sediment, and that no effect of salinity would be found on any of the three behaviors studied. We conducted a set of flume experiments to test these hypotheses by increasing shear stress in the presence of different sediment (sand versus gravel) and salinity (15 versus 25) treatments. The overall aim was to define the most suitable habitats for juveniles, which could be useful for managing releases of hatchery-produced juveniles through a restoration program, for fishing management, and for the development of marine protected areas.

1.3 MATERIAL AND METHODS

1.3.1 JUVENILE HATCHERY CONDITIONS

Two-year-old winter flounder juveniles (mean length 10.35 ± 0.82 cm, mean weight 17.1 ± 3.4 g) produced at the Pointe-au-Père Aquaculture Research Station (ISMER, UQAR, Quebec, Canada) were used for this study. Scott and Scott (1988) reported a mean length of 11.4 cm in Passamaquody Bay, and 17.8 cm in St. Marys Bay for two years-old wild winter flounder. Considering that these areas are warmer than the Saint-Lawrence estuary, size of juveniles should be close to wild juveniles from this area. Egg fertilization was done according to Ben Khemis et al. (2000), and larval and post-settlement juvenile rearing according to Vagner et al. (2013). During the experimental period, juveniles were reared in rectangular open-flow tanks supplied with filtered sea water ($50 \mu\text{m}$, 5L min^{-1}) pumped from the St. Lawrence estuary; the inlet was 1 km off shore from the station. Tanks were exposed to artificial light ($6.5 \mu\text{Einstens}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, natural photoperiod). Commercial filtration sand was used as the substratum and juveniles were fed with a commercial food (Lansy microdiet, INVE Aquaculture Inc.) at a daily rate of 3% of their body weight.

1.3.2 FLUME EXPERIMENTS

Experiments were conducted using the Aquatron racetrack flume at the Aquaculture Research Station. This recirculating flume was designed to generate steady turbulent benthic boundary flows induced by the friction of twelve rolling plastic disks (0.5 cm thick). A description of the benthic boundary layer (BBL) conditions and flume technical details can be found in Redjah et al. (2010). Briefly, the experimental zone (91.5×45 cm) can be filled with a layer of at least 5 cm of sediment. For each trial, water height was set at 15 cm to maximize development of the BBL (Olivier et al. 1996), resulting in a water volume of 800 L. Because the flume is located in a room with no air-temperature control, seawater temperature increased from $7 \pm 1^\circ\text{C}$ at the beginning of the experiment to $14.25 \pm 1^\circ\text{C}$ at the end.

Two weeks before the beginning of the experimental period, which lasted four weeks (29 May to 24 June 2015), we decreased the salinity in two of the four rearing tanks to 15 by mixing saltwater with dechlorinated tap water. The other two tanks were subjected to natural salinity (26.44 ± 0.76) and temperature (6.53 ± 0.62) variations.

For each experiment, five juvenile winter flounder were randomly chosen from the two saltwater or brackish water tanks for the salinity treatment. Different juveniles were used for each experiment, for a total of 100 individuals for the whole experimental period. Four treatments with five replicates each (total of 20 trials) were done. Each treatment included one salinity (15 or 25) and one sediment (gravel or sand) treatment, for a total of four possible combinations. The mean shear velocity (u^*) was increased from 0.26 to 1.78 cm s^{-1} for the sandy sediment and from 0.35 to 2.14 cm s^{-1} for the gravel. This corresponds to an increase in current speed interval (U_z) from 5 cm s^{-1} to 30 cm s^{-1} for the two sediment types. Five U_z values were considered for the analysis: 10 min plateau of 5, 5 to 20, 20, 20

to 30, and 30 cm s^{-1} (Fig. 1). An increase of $U_z=5\text{cm}$ of 1 cm s^{-1} per minute was used to avoid substrate erosion.

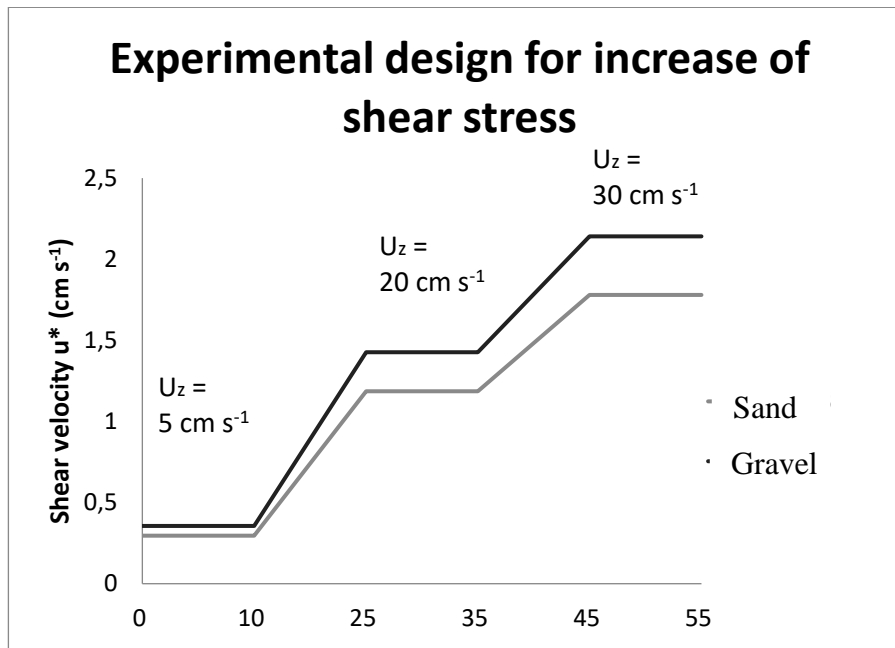


Figure 1 : Experimental design for increase of shear stress according to time for the treatments ‘sand’ and ‘gravel’. Time = 0 minutes is the beginning of the experiment, after the acclimation period.

The same protocol was adopted for each trial. One day before an experiment, the flume was emptied and rinsed with freshwater. Sediments to be tested were disinfected with a Vircon solution (10 g per 1 L of water; Vircon, Vétoquinol, Lavaltrie, Quebec, Canada) for 12 h and then rinsed with freshwater for another 12 h. Sediment was placed in the experimental section and the flume was then filled with either brackish or salt water. Batches of juveniles, which were transported in a jar with a solution 0.13 L of stresscoat per

1 L of brackish or salt water (Stresscoat+, Mars Fishcare Inc., Hamilton, PA, USA) were then introduced into the experimental zone. Because preliminary tests showed that the juvenile winter flounder dispersed throughout the flume, we installed plastic grid barriers to restrict them to the experimental section and applied a low current (shear velocity less than $u^* = 0.20 \text{ cm s}^{-1}$) and aeration for the night. This acclimation period lasted for 16 hours, during which this photoperiod and light intensity conditions were similar to those of the rearing tanks. Juveniles were starved 24 h before the beginning of the experiments to avoid digestion during the experiments, which could potentially reduce their activity. The following morning, the barriers were removed and the experiment started with the increase in u^* as detailed in Figure 1. Flounder juveniles were weighed and measured after each trial.

A GoPro HERO3 Silver Edition camera (GoPro Inc., San Mateo, California, USA) was used in dorsal view to record fish behavior in the experimental zone during all experiments. Based on all video recordings, we identified three types of behavioral responses of juvenile winter flounder to salinity and sedimentary treatments: swimming activity, orientation relative to the main current, and burying ability. To establish time budgets (% of active behavior per observation period), we only considered the activity of flounder in the experimental zone. Moreover, individuals staying more than 75% of the observation period outside of the experimental zone were excluded from the time-budget analyses of behaviors for that observation period. We adopted this approach to avoid attributing a very high behavior score to a fish staying most of its time outside the experimental zone.

1.3.3 BEHAVIORAL VARIABLES

Several variables were defined according to the particular type of behavioral response. Burying-dependent variables included six states: “not buried,” “body covered less than 25% by sediment,” “body covered from 25% to 50%,” “body covered from 50% to 75%,” “body covered from 75% to 100%,” and “totally buried.” Orientation-dependent variables included “positive rheotaxis,” “negative rheotaxis,” and “transverse position.” The first two situations were scored if juveniles were at least at a 70 degrees’ angle from the transverse position (for scoring of orientation, see Champalbert et al. 1994). Orientation variables were only scored when juveniles were in contact with the sediment. Variables related to swimming activity included: “swimming close to the sediment with periods of rest,” “passive drifting,” “swimming far from the sediment,” and “carried away by the current.” The four variables were combined to form the variable “total swimming activity.” Time spent outside the experimental zone was also recorded. The Observer XT 9 software (Noldus Information Technology B.V., Wageningen, Netherlands) was used to analyze the videos and create the time-budget database.

1.3.4 STATISTICAL ANALYSES

The effect of salinity and sediment treatments as well as the shear velocity range on behavioural variables (burying, orientation, and swimming) were analyzed using three-way ANOVA with repeated measures for each hydrodynamic level using STATISTICA v6.0 (Dell Inc., Tulsa, Oklahoma, USA). Normality was verified with the Kolmogorov-Smirnov test and heteroscedasticity with Levene’s test. We performed a square-root transformation on “total swimming activity” and “not buried” data to attain normality. We also combined the “75% buried,” “50% buried,” and “25% buried” variables into a single “25% to 75% buried” variable to allow data normality. We were not able to analyze all the data relative to the “less than 25% buried” variable because this condition did not occur for sand

treatments. We thus only analyzed data associated with the gravel treatment for that variable. It should be noticed that treatment effects of the whole set of variables were also analyzed using a three-way PERMANOVA. Data were transformed prior to the analysis (square root of arc cosinus). The software Primer 6.1.1.12 and the PERMANOVA+ add-on (PRIMER-E Ltd, Ivybridge, United kingdom) were used. The PERMANOVA analyses (9999 permutations) were based on an Euclidian distance matrix. Homoscedasticity was tested with PERMDISP procedure ($p < 0.05$). As the results were similar to the ones obtained with ANOVA, they are not presented here. Length and weight of juveniles were compared with a two-way ANOVA (sediment and salinity factors) to validate the absence of differences between treatments. We did not use these data as covariates because no differences between treatments were found ($p \leq 0.01$).

1.4 RESULTS

Sediment treatment was the only factor that significantly influenced the burying behavior of winter flounder juveniles (Table 1A, 1B & 1C), but sediment had no effect on rheotaxis behaviors (Table 1D, 1E & 1F). The time budgets of the three burying variables (100% buried, 25–75% buried, and not buried) were significantly different between sand and gravel treatments. As predicted in the second hypothesis, burying behavior was hindered in the gravel treatment. Indeed, juveniles spent significantly more time not buried or 25% to 75% covered for the gravel treatment experiments (Fig. 2). Only 10% of juveniles tested on gravel were observed entirely buried. The juveniles that were 100% buried were only those on the sand substrate (Fig. 2).

Our first hypothesis was rejected because shear velocity did not change juvenile orientation (Table 1D, 1E & 1F); neither did salinity or sediment. The only significant interaction was found between sediment and u^* (Table 1G), and this was explained by a

significant increase in flounder found outside the experimental zone when submitted to high shear velocities with gravel in the experimental zone (Fig. 3). At intermediate u^* , i.e., from 0.29 to 1.18 cm s^{-1} for sand and 0.35 to 1.42 cm s^{-1} for gravel (U_z corresponding to 5 cm s^{-1} to 20 cm s^{-1}), the average time spent in the experimental zone in positive rheotaxis, negative rheotaxis, or in a transverse orientation were 30.4 ± 6.1 , 30.1 ± 6.1 , and $37.5 \pm 4.8\%$, respectively. No effect of any of the three factors was observed on orientation (Table 1D, 1E, 1F). Although shear velocity did not influence the total swimming activity (Table 1H), there was no occurrence of “passive drifting” or “carried away by the current” during the first two observation periods for shear velocity. We could only determine time budgets for these variables starting at $u^*=1.18 \text{ cm s}^{-1}$ for sand and 1.42 cm s^{-1} for gravel (U_z of 20 cm s^{-1}). For the “passive drifting” swimming type, fish propelled themselves in the water column close to the sediment in the same direction of the flow, and glided by being pushed by the current. Individuals were seen in various conditions floating through the experimental zone without touching the bottom. A few individuals attempted to glide, but pushed themselves too far from the bottom ($z>5 \text{ cm}$) and were carried away by the flow while tumbling backwards. Thus, the swimming type “carried away by the flow” only happened when fish were swimming against the flow. At high hydrodynamic conditions, swimming far from the bottom was the least efficient swimming response. Without quantifying it, we observed that the heads of fish were higher than the rest of the body when they propelled themselves in the water column. No fish was carried away when buried or resting on top of sediment.

Table 1: ANOVA table for the different types of measured behaviours (table sections A through H)

Variable tested	A - Time budget of "100% buried"				B - Time budget of "25% to 75% buried"			
	SS	DF	F	P	SS	DF	F	P
Slope intercept	14.657	1	120.99	<0.001	15.442	1	104.054	<0.001
Sediment	11.229	1	92.696	<0.001	2.525	1	17.015	<0.001
Salinity	0.057	1	0.471	0.502	0.021	1	0.144	0.709
Sediment x Salinity	0.056	1	0.469	0.503	0.017	1	0.116	0.737
Error	1.817	15			2.226	15		
Shear stress	0.023	4	0.423	0.791	0.161	4	1.59	0.188
Shear stress x Sediment	0.058	4	1.061	0.383	0.023	4	0.233	0.918
Shear stress x Salinity	0.013	4	0.24	0.914	0.109	4	1.076	0.375
Shear Stress x Sediment x Salinity	0.04	4	0.725	0.577	0.114	4	1.12	0.355
Error	0.828	60			1.527	60		
	C - Time budget of "not buried"				D - Time budget of "positive rheotaxis"			
	SS	DF	F	P	SS	DF	F	P
Slope intercept	4.832	1	47.905	<0.001	8.124	1	38.657	<0.001
Sediment	1.748	1	17.336	<0.001	0.147	1	0.699	0.416
Salinity	0.05	1	0.503	0.488	0.086	1	0.411	0.53
Sediment x Salinity	0.006	1	0.068	0.796	0.031	1	0.147	0.705
Error	1.513	15			3.152	15		
Shear stress	0.198	4	1.333	0.267	0.03	4	0.213	0.929
Shear stress x Sediment	0.3	4	2.018	0.103	0.336	4	2.34	0.065
Shear stress x Salinity	0.078	4	0.53	0.713	0.12	4	0.834	0.508
Shear Stress x Sediment x Salinity	0.119	4	0.805	0.526	0.122	4	0.852	0.497
Error	2.233	60			2.157	60		
	E - Time budget of "negative rheotaxis"				F- Time budget of "transverse orientation"			
	SS	DF	F	P	SS	DF	F	P
Slope intercept	6.185	1	30.599	<0.001	17.978	1	93.421	<0.001
Sediment	0.001	1	0.009	0.923	0.12	1	0.625	0.441
Salinity	0.032	1	0.154	0.699	0.007	1	0.036	0.85
Sediment x Salinity	0.018	1	0.093	0.763	0	1	0.001	0.97
Error	3.031	15			2.886	15		
Shear stress	0.134	4	1.324	0.271	0.246	4	2.353	0.063
Shear stress x Sediment	0.246	4	2.426	0.057	0.156	4	1.499	0.213

Shear stress x Salinity	0.101	4	1.001	0.414	0.073	4	0.699	0.595
Shear Stress x Sediment x Salinity	0.082	4	0.812	0.522	0.182	4	1.741	0.152
Error	1.524	60			1.569	60		

	G - Time budget of "outside the experimental zone"				H - Time budget of "total swimming activity"			
	SS	DF	F	P	SS	DF	F	P
Slope intercept	10.112	1	99.659	<0.001	0.389	1	39.47	<0.001
Sediment	0.949	1	9.357	0.007	0.015	1	1.557	0.231
Salinity	0.226	1	2.229	0.154	0.001	1	0.118	0.735
Sediment x Salinity	0.032	1	0.323	0.577	0.003	1	0.363	0.555
Error	1.623	16			0.148	15		
Shear stress	0.557	4	9.877	<0.001	0.019	4	0.892	0.474
Shear stress x Sediment	0.376	4	6.67	<0.001	0.011	4	0.507	0.73
Shear stress x Salinity	0.126	4	2.244	0.073	0.047	4	2.137	0.087
Shear Stress x Sediment x Salinity	0.061	4	1.098	0.365	0.003	4	0.172	0.951
Error	0.902	64			0.33	60		

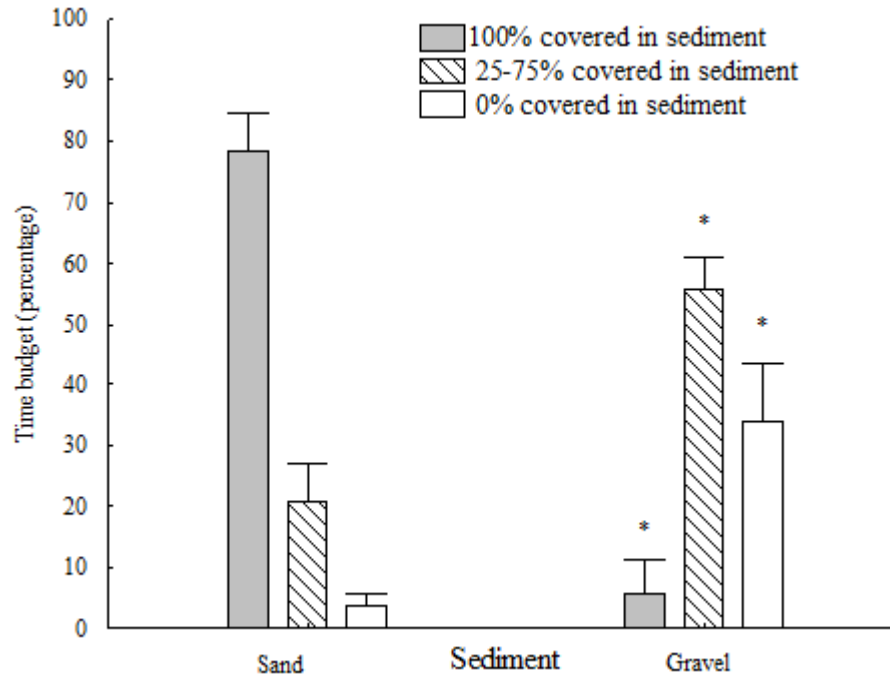


Figure 2: Time budget for the behaviors ‘not buried’, ‘25%-75% buried’ and ‘100% buried’, chosen at current speed 20-30 cm s⁻¹. Mean ± SE. All results on gravel are significantly different ($p \leq 0.05$) than the one on sand. N = 10 for each bar.

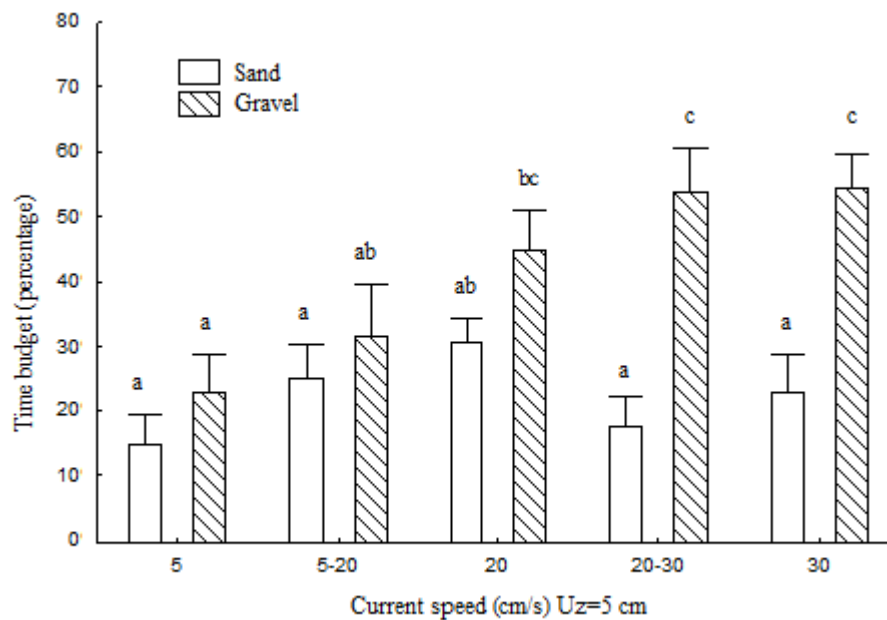


Figure 3: Current speed and sediment effects (current speed x sediment interaction, $p \leq 0.05$) on time budget for juveniles that spent time outside of the experimental zone. Mean \pm SE. Means with different letters are significantly different ($p \leq 0.05$). $N = 5$ for each bar.

1.4 DISCUSSION

1.4.1 SWIMMING BEHAVIOR

The first contribution of this work is the detailed characterization of the swimming modes used by winter flounder juveniles. While the experimental conditions did not modify the time spent in total swimming activity, we observed that more individuals used the flow and were passively transported at high shear velocities ($u^* > 1$ up to 2.14 cm s^{-1}). Below this threshold value, we did not observe any passive drifting. Indeed, mathematical

calculations previously showed that passive drifting can reduce the cost (energy consumption) of swimming by 90% per unit distance in juvenile flatfishes (Weihs 1978), but such transport is restricted to the direction of the flow. When studying tidal migrations of juvenile and adult winter flounder with underwater cameras at the Passamaquoddy Bay (New Brunswick, Canada), Tyler (1971) observed that fish followed the direction of the tidal current. Although Tyler (1971) did not describe the type of swimming, it is reasonable to hypothesize that passive drifting was used during these tidal migrations.

In the present study, a few cases of juveniles unable to withstand the flow were observed (“carried away by the flow” behaviour), but only when fish were swimming away from the sediment. We speculate that by exposing more body surface to the flow, juveniles increase the drag force, causing them to tumble backwards. When this happens, they are no longer able to swim, and some individuals tumbled backwards over the entire flume. This could be problematic in natural habitats because the fish could be carried away to unsuitable habitats.

The behavior “swimming close to the sediment with periods of rest” was expressed by juveniles swimming actively close to the sediment with clear fin movement, often for a short distance followed by a rest period. This type of swimming was observed in all directions at all the tested shear velocities, and visual observations suggest that the juveniles glided through fin movements and not because of a flow effect. This type of swimming has also been observed in juvenile plaice in natural habitats (Gibson 1980). When swimming actively close to the bottom, juvenile winter flounder was not using BBL flows for transport. Although our experimental design was such that fish observations were made only from the flume’s water surface, we hypothesized that transport was driven by fin movements and body propulsion. The resting periods observed between these short swimming activities could indicate that this type of swimming was energetically costly. The experimental flume work of Joaquim et al. (2004) used a cardiac function test to

demonstrate this energy demand for a similar swimming type in adult winter flounder. However, the major advantage of this type of swimming compared to passive drifting is that fish can swim in any direction relative to the flow while remaining close to the sediment.

In contrast to sandy treatments, juveniles that had settled on gravel left the experimental zone significantly more often and remained longer to rest on the flume's bottom under high shear velocity conditions. This fish movement was clearly active: no sediment erosion occurred and fish were not passively carried away. Juvenile plaice and turbot tested for sediment selection in the laboratory were observed to favour a bare surface over a coarse substrate (Nasir and Poxton, 2001); this may suggest that coarse sediments are unsuitable areas for flatfish settlement. Indeed, areas of high hydrodynamics associated with coarse sediments have been shown to reduce growth in juvenile winter flounder in a New Hampshire estuary, and it was suggested that the energy spent in unsuccessful burying could explain the low growth rates (Fairchild et al. 2005).

If these movements were active, why would fish select a bare surface over gravel? When submitted to high current speeds, winter flounder juveniles could use postures to prevent being carried away by the current, as described for plaice in Arnold and Weihs (1978) and Gerstner and Webb (1998). Behavioral responses include evacuating water under the body by fin burying, body undulations, and fin beating. Similarly, it was observed that juvenile sturgeons (*Acipenser brevirostrum*) increase station-holding with high current velocity, probably to reduce energetic costs from swimming (Kieffer et al. 2009). We can hypothesize that juveniles were not able to burrow deep enough in coarse sediments (lack of strength) or correctly perform the postures to prevent being carried away by the current. We suggest that it was easier to maintain contact with the bottom on resin-covered wood than on gravel. Unfortunately, the walls of the flume were opaque, preventing lateral observations of the fish.

1.4.2 EFFECTS OF SEDIMENT AND SALINITY ON JUVENILE FLOUNDER BEHAVIOUR

The selectivity of winter flounder juveniles for sandy over gravelly sediments was evident in the present work, strengthening previous results of experiments conducted on both cultured and wild fishes (Manderson et al. 2000; Phelan et al. 2001; Fairchild and Howell 2004) as well as from caging studies and beam trawl field surveys (Goldberg et al. 2002). However, none of these cited studies integrated time-budget assessments or characterization of the swimming behaviors and orientation in BBL flows, especially when considering the shear velocity/sediment texture interactions.

In sand, fish were able to cover themselves entirely just after their introduction to the flume. Ellis and coauthors (1997) demonstrated that the cryptic ability in plaice is a learned behavior and observed that flatfish reared without sediment in tanks need time to learn how to bury themselves properly. Our juveniles were reared in tanks filled with filtration sand from hatch until metamorphosis, which could explain the high burying speed observed in our study.

In our work, salinity had no influence on the behavior or selectivity of sediment by the flounder. We chose to acclimate juveniles to the salinity conditions of the two treatments (salinity of 15 and 25 for at least one week of acclimatization) before transfer to the flume to avoid osmotic shock that could have generated subsequent erratic or unnatural behavioral responses.

1.4.3 ORIENTATION

Our batches of juvenile flounder showed no rheotactic responses to flow, which was unexpected. Rheotaxis has been observed at lower current speeds than the maximum value used in our study in many flatfish species such as adult plaice on a bare surface (Arnold and Weihs 1978) and juvenile sole on sediment (Champalbert and Marchand 1994). Moreover,

Arnold and Weihs (1978) argued that positive rheotaxis should be the most hydrodynamic position.

1.5 CONCLUSION

Our results clearly indicate that winter flounder juveniles use different types of swimming depending on current speed, that they more readily abandon a gravel bottom for bare smooth surfaces at high shear stress, and that they have a higher burial rate in sand. In both sediment types, the effect of salinity on swimming, orientation, and burying behaviors was negligible. This information is not only of interest in terms of the ecological understanding of habitat preference, but will also facilitate habitat selection for the purpose of population enhancement. Based on such results, the aquaculture industry could select the most suitable release sites for hatchery-reared juvenile winter flounder. Our results indicate that coastal areas characterized by fine sediment and low current speeds have a high potential for the successful establishment of juvenile winter flounder nurseries.

A better understanding of the effects of abiotic factors on the behavior of juvenile winter flounder will help understanding their distribution and habitat preferences. The release of juveniles in unsuitable environments, i.e., with regard to hydrodynamics and sediment texture, may induce greater dispersion rates. Unnatural behaviors of juvenile cultured flatfishes, such as spending more time off-bottom, have been shown to increase the risk of predation (Fairchild and Howell 2004; Kellison et al. 2000). The careful choice of release environments for cultured juvenile winter flounder could prevent dispersion and for visibility to predators, as we have shown in this study that the treatment high current – gravel sediment increase swimming activity of fish.

DISCUSSION GÉNÉRALE

Cette discussion générale couvre des aspects non couverts dans la discussion de l'article scientifique présenté au chapitre 1.

RETOUR SUR LE MODE DE RÉSISTANCE AU COURANT DE LA PLIE ROUGE JUVÉNILÉ

Notre première hypothèse a été infirmée puisque nous n'avons pas pu prouver que la plie rouge juvénile se place en position rhéotaxique avec l'augmentation du courant, contrairement à d'autres espèces de poissons plats qui montrent ce type de réponse comportementale. Champalbert et Marchand (1994) ont montré que chez la sole, seulement les juvéniles enfouis pouvaient résister au courant à 20 cm/s lorsque placés dans un canal hydrodynamique avec un fond de sédiment. L'étude a été effectuée sur des poissons plus petits (2-3 cm) que ceux que nous avons utilisés et ceux-ci se plaçaient en position rhéotaxique positive dès l'augmentation du courant. Il est possible que rhéotaxie et enfouissement soient des mécanismes utilisés par la sole juvénile pour résister au courant. L'absence de ces comportements chez les juvéniles de plie rouge pourrait s'expliquer par une forte adhérence au substrat. Ainsi, dans notre expérience, aucune plie rouge juvénile au sol (couverte de sédiment ou non) n'a été emportée par la force du courant, même à une vitesse de 30 cm/s. Les seules observations d'animaux emportés par le courant ont été faites chez des individus qui nageaient dans la colonne d'eau.

Nous avons observé dans nos expériences en canal hydrodynamique des mouvements de nageoires (battement afin d'évacuer l'eau sous le corps, et insertion des nageoires dans le sédiment) lors de l'augmentation de la vitesse de l'écoulement (Arnold 1969). Ce type de comportement pourrait être utilisé par les juvéniles de plie rouge pour limiter la dispersion, car observé durant nos expériences en canal hydrodynamique. Aussi, en absence d'érosion du sédiment, l'enfouissement pourrait générer une protection supplémentaire en raison du

sédiment déplacé en amont du corps. Dans notre étude, les mouvements d'enfouissement ne sont pas nécessairement accompagnés d'un ensablement, mais il était impossible de déterminer l'impact d'un tel comportement sur la résistance au courant avec notre dispositif expérimental empêchant toute observation en vue latérale. Toutefois, l'opacité des parois permet de cacher la présence de l'observateur, et donc, potentiellement de minimiser le stress chez les plies présentes dans la zone expérimentale. Étudier les mouvements latéraux demanderait sans doute de concevoir un système permettant de capter les mouvements latéraux en l'absence de l'expérimentateur (caméras positionnées adéquatement).

RHÉOTAXIE ET MIGRATION

La combinaison rhéotaxie – dérive passive est impliquée dans la migration de deux espèces de poissons plats: la plie commune adulte et la sole adulte et juvénile (Arnold 1974; De Veen 1978; Champalbert et Marchand 1994; Champalbert et al. 1994). En réponse à un écoulement, ces animaux utilisent l'orientation rhéotaxique positive au sol afin de lui résister. Lorsque l'écoulement est en direction de zones favorables, telles les zones d'alimentation, ces poissons utilisent la dérive passive en se propulsant dans la couche limite de fond. Il est difficile de déterminer quels facteurs régissent l'utilisation de la rhéotaxie chez les poissons plats, quoique quelques hypothèses aient été suggérées par des chercheurs, par exemple l'effet combiné de la variation de salinité et de celle de la marée (*Solea solea*, Champalbert et Marchand 1994; Champalbert et al. 1994).

L'absence de réponse rhéotaxique systématique à un écoulement chez la plie rouge juvénile ne permet pas de faire des liens simples avec les comportements de déplacement observés en milieu naturel. Cependant, nous suggérons que la dérive passive est utilisée pendant les migrations tidales. Les résultats de cette étude indiquent que les poissons pourraient sélectionner des intensités de courant qui permettent la dérive passive pour une

dispersion sur de plus grandes distances, car cette méthode de nage n'est observée qu'au-delà d'une vitesse seuil de 20 cm/s.

De nouvelles études avec caméras vidéo en milieu naturel ou des approches *random-walk*, impliquant la comparaison de méthodes de télémétrie *in situ* des poissons à des trajectoires aléatoires modélisées, pourraient apporter des éléments d'interprétation sur le déterminisme des mouvements journaliers ou saisonniers de cette espèce, comme l'ont démontré Decelles et Cadrin (2010) et Fairchild et al. (2009).

COMPARAISON AVEC D'AUTRES ESPÈCES

Gibson et Robb (1992) ont développé un graphique afin de prédire la capacité d'enfouissement d'une plie commune juvénile pour une texture sédimentaire donnée. Sur la base de la longueur du poisson et d'une moyenne de grosseur de grains de sédiment, le modèle prédit le pourcentage du corps couvert de sédiment moyen. L'équation ne prend en compte aucun autre facteur. En utilisant les données de mon expérience dans le graphique développé par Gibson et Robb, (taille moyenne d'individus de 10 cm, granulométrie de +1 phi pour le sable et -1 phi pour le gravier), le graphique propose 100% d'enfouissement dans le sable et moins de 60% dans le gravier. Les résultats de mon expérience démontrent que 87 ± 13 % du corps devrait être recouvert de sédiment sur le sable et 31 ± 22 % sur le gravier, soit des résultats comparables aux prédictions du modèle de Gibson et Robb. Ce modèle pourrait donc être utilisé afin de prédire si un sédiment est favorable ou non à l'enfouissement.

DEGRÉS DE LIBERTÉ

Puisqu'une expérience prenait une journée de préparation, et que quatre traitements ont été choisis, seuls cinq réplicats ont été réalisés. La période expérimentale d'environ trente jours a permis de ne pas inclure la taille ou la masse des individus comme covariables, car celles-ci n'ont pas varié significativement durant les expériences. Par contre, il est plus difficile de mettre en lumière certaines tendances lorsque le degré de liberté est petit. Notre expérience a permis de tirer un portrait d'ensemble des comportements d'enfouissement, de nage et d'orientation de la plie rouge juvénile en fonction de trois facteurs abiotiques, mais des études portant sur un facteur en particulier (comme la rhéotaxie) avec un nombre supérieur de réplicats pourraient révéler des tendances et des subtilités que nous n'avons pas pu confirmer de façon statistique.

LUMINOSITÉ

Selon McCracken (1963), les plies juvéniles, de 12-18 cm de longueur, se retrouvent généralement dans les zones plus obscures comparativement à des zones plus lumineuses (expérience utilisant des ampoules incandescentes de 100, 60, 25 ou 7,5 Watts). Il pourrait être intéressant d'ajouter ce facteur à des études ultérieures en mimant la luminosité naturelle afin de vérifier si les comportements diffèrent en fonction de l'intensité lumineuse et la période de la journée. Par exemple, chez la plie commune (Burrows et al 1994) et les juvéniles de sole (Champalbert et al. 1990), l'activité augmente à l'obscurité.

ÉTAT PHYSIOLOGIQUE

Les plies étaient à jeun depuis 24h lors des tests en canal hydrodynamique afin d'éviter que les poissons ne soient en période de digestion et donc potentiellement moins

actifs. En effet, il a été démontré que la sole juvénile est plus active en l'absence de proies et que l'activité natatoire diminue après les périodes d'alimentation (Champalbert et al. 1990; Macquart Moulin et al. 1991). Par ailleurs, chez des animaux domestiqués, la recherche de nourriture peut prendre différentes formes. En élevage, les plies rouges juvéniles utilisées dans l'expérience étaient nourries à la moulée commerciale peu de temps après la métamorphose. Kellison et al. (2000) ont remarqué que les juvéniles de cardeau d'été d'élevage passaient plus de temps en moyenne à nager dans la colonne d'eau comparativement aux juvéniles sauvages et ont émis l'hypothèse que ce comportement serait dû au fait que ces poissons étaient habitués à manger de la moulée qui reste en suspension.

Nonobstant ces différences potentielles dans les types de comportement, nous avons émis l'hypothèse que des animaux à jeun seraient plus actifs et donc qu'il serait plus facile de mesurer l'occurrence de comportements divers.

PERSPECTIVES

Il ne faut pas sous-estimer l'effet de la complexité des interactions entre facteurs biotiques et abiotiques, lesquelles sont minimisées dans un contexte expérimental. Ainsi, la présence de proies et de couvert de macroalgues et d'herbiers peut modifier la préférence sédimentaire de la plie rouge juvénile (Manderson et al. 2000; Phelan et al. 2001). Les mouvements sont également plus variables et moins unidirectionnels lorsque les proies sont abondantes (Phelan et al. 2001). Une étude effectuée au New Hampshire démontre que la distribution spatiale des juvéniles de 25-55 mm serait influencée par la présence de proies (Fairchild et al. 2008), bien que d'autres travaux n'aient pas fait de liens entre ces deux facteurs, indiquant que d'autres facteurs biotiques ou abiotiques influenceraient la distribution (Wanat 2002; Meng et al. 2005; Fairchild et al. 2005). Il serait intéressant de

réaliser d'autres études faisant intervenir différentes combinaisons de ces facteurs abiotiques et biotiques. Par exemple, une étude en canal hydrodynamique similaire à celle-ci mais en présence de proies pourrait décrire les comportements d'enfouissement, de nage et de sortie de la zone expérimentale et permettre ainsi de vérifier si la plie rouge juvénile peut se nourrir adéquatement sous forte contrainte de cisaillement.

Nous considérons que les résultats obtenus dans cette étude, impliquant des individus d'élevages, pourraient s'appliquer aux juvéniles de plie rouge sauvages. En effet, les juvéniles de plie rouge sauvages et d'aquaculture colonisent des habitats aux conditions environnementales très proches notamment si l'on considère l'oxygène dissous, la salinité, la profondeur, et les types de sédiments (Fairchild et al. 2009). Selon Champalbert et al. (1994), pour la même luminosité et salinité, le comportement est le même chez la sole juvénile sauvage et d'aquaculture en canal hydrodynamique. Selon Ellis et al. (1997), la sole sauvage et la sole d'aquaculture montrent également les mêmes préférences sédimentaires. Aussi, aucune différence pour la proportion de plie commune juvénile sur trois sédiments fins n'a été détectée dans des expériences de préférence sédimentaire en laboratoire et en milieu naturel (Gibson et Robb 2000).

Avec les données acquises dans cette étude et celles de la littérature, il serait possible de cibler les zones côtières à faible courant et avec un sédiment favorable à l'enfouissement, tout en incluant divers facteurs biotiques et abiotiques ayant une influence sur la distribution spatiale de la plie rouge juvénile, par exemple une profondeur de moins de 100 m. Avec un logiciel de système d'information géographique (SIG), une carte pourrait être construite avec les zones les plus probables de retrouver des juvéniles de plie rouge et cibler les zones les plus favorables à la survie des juvéniles issus de l'aquaculture lors de la remise en liberté. Les modèles pourraient être validés avec des sorties en mer. Selon les résultats trouvés dans cette étude, les zones comportant un u^* de moins de $1,4 \text{ cm s}^{-1}$ dans

des sédiments grossier devrait être considérées comme moins favorable pour la survie de la plie rouge juvénile.

SÉDIMENT DANS LES BASSINS D'ÉLEVAGE

Les juvéniles testés dans cette étude ont été élevés dans des bassins contenant des sédiments. Selon Ellis et al. (1997), la présence de sédiment dans les bassins d'aquaculture augmenterait la capacité d'enfouissement une fois les juvéniles relâchés en milieu naturel. Nous avons vu que les plies rouges juvéniles étaient très actives pendant la période d'acclimatation mais qu'elles pouvaient s'enfouir entièrement dans le sable dès leur entrée dans la zone expérimentale. Nous recommandons donc l'utilisation de sédiment dans les bassins de croissance pour la production de juvéniles en aquaculture. Finalement, il serait intéressant de voir l'effet et l'utilité des cages d'acclimatation lorsque les juvéniles sont élevés en aquaculture sur du sédiment et que l'ensemencement se fait dans des zones favorables.

Nous avons démontré que la plie rouge juvénile tend à quitter des zones défavorables au maintien en place (sédiment grossier et courant élevé). Lorsque transposés dans des habitats défavorables à des fins d'ensemencement, il est possible que les poissons de cette espèce soient plus à découvert et tentent de quitter ces zones, s'exposant ainsi davantage aux prédateurs. Selon Fairchild et Howell (2004), l'absence de prédateurs en aquaculture pourrait empêcher le développement de la reconnaissance et des réponses anti-prédateurs. La sélection d'habitat favorable à l'ensemencement ainsi que l'utilisation de cages d'acclimatation pourraient augmenter la survie et diminuer la dispersion des juvéniles lors de la remise en milieu naturel.

CONCLUSION

Nos résultats ont montré que les juvéniles de plie rouge utilisent différents types de nage en fonction de la vitesse de courant. À forte vitesse de cisaillement, les juvéniles désertent plus facilement les fonds de gravier pour utiliser des surfaces lisses et auront une plus grande propension à s'enfouir dans le sable. Pour les deux types de sédiments testés, les effets de la salinité sur la nage, l'orientation et le comportement d'enfouissement sont négligeables. Globalement, nos résultats indiquent que les zones côtières caractérisées par des sédiments fins et de faibles vitesses de courant devraient constituer de bons habitats pour l'établissement de nurseries de juvéniles de plie rouge. Ils sont d'intérêt non seulement pour une meilleure compréhension des facteurs qui influencent les préférences d'habitat, mais également pour sélectionner des habitats en milieu naturel afin de mieux cibler les sites d'ensemencement destinés à rétablir ou à augmenter les effectifs naturels de plie rouge.

ANNEXES

ANALYSE NON PARAMÉTRIQUE DES TYPES DE NAGE

Une analyse non paramétrique sur les rangs pour des données appariées a été réalisée sur les trois variables de nage ‘dérive passive’, ‘perte de contrôle’, où les plies culbutent et perdent la capacité de nager, et ‘nage ras du sol’. Les comportements de nage ont été comparés entre les cinq vitesses de courant pour une salinité donnée et un type de sédiment donné. Les tables ANOVA de Friedman sont aussi en annexe.

Nous avons observé des différences pour les comportements de dérive passive entre les différentes vitesses d’écoulement, mais seulement à une salinité de 15, peu importe la nature de substrat. Nous suggérons donc que des expériences additionnelles devraient être réalisées pour valider l’effet d’une salinité faible sur le comportement migratoire tidal de cette espèce.

Pour les plies qui nagent ras au sol, il n’y a aucune différence détectée entre les vitesses quelle que soit la salinité et quel que soit le type de sédiment. C’est un type de nage qui semble adapté pour aller à contre-courant ou dans le sens du courant.

Annexe 1 : ANOVA de Friedman pour le Type de nage «dérive passive», testé pour les facteurs «salinité 15 et sable»

Vitesse du courant (z=5 cm)	Rang moyen	Somme des rangs	Moyenne	Écart-type
5 cm/s	4,100000	20,500000	10,500000	
5-20 cm/s	4,100000	20,500000	10,500000	
20 cm/s	2,600000	13,000000	10,000000	5,590170
20-30 cm/s	3,200000	16,000000	10,900000	4,248529
30 cm/s	1,000000	5,000000	7,000000	

Différence significative entre les différentes vitesses de courant pour les facteurs «salinité 15 et sable». ANOVA du χ^2 ($N = 5$, $dl = 4$) = 13,93684 $p < 0,00750$, coefficient de Concordance = 0,69684 et rang moyen $r = 0,62105$

Annexe 2 : ANOVA de Friedman pour le Type de nage «dérive passive», testé pour les facteurs «salinité 15 et gravier»

Vitesse du courant (z=5 cm)	Rang moyen	Somme des rangs	Moyenne	Écart-type
5 cm/s	4,100000	20,500000	10,500000	
5-20 cm/s	4,100000	20,500000	10,500000	
20 cm/s	3,200000	16,000000	11,400000	5,412947
20-30 cm/s	2,600000	13,000000	9,000000	
30 cm/s	1,000000	5,000000	7,000000	

Différence significative entre les différentes vitesses de courant pour les facteurs «salinité 15 et gravier». ANOVA du Chi² (N = 5, dl = 4) = 13,93684 p < 0,00750, coefficient de Concordance = 0,69684 et rang moyen r = 0,62105,

Annexe 3 : ANOVA de Friedman pour le Type de nage «dérive passive», testé pour les facteurs «salinité 35 et sable»

Vitesse du courant (z=5 cm)	Rang moyen	Somme des rangs	Moyenne	Écart-type
5 cm/s	3,500000	17,500000	10,500000	
5-20 cm/s	3,500000	17,500000	10,500000	
20 cm/s	2,100000	10,500000	9,200000	3,801316
20-30 cm/s	2,600000	13,000000	10,900000	4,248529
30 cm/s	3,300000	16,500000	12,400000	4,929503

Pas de différence significative entre les différentes vitesses de courant pour les facteurs «salinité 35 et sable». ANOVA du Chi² (N = 5, dl = 4) = 3,319149 p < 0,50591, coefficient de Concordance = 0,16596 et rang moyen r = -,0426.

Annexe 4 : ANOVA de Friedman pour le Type de nage «dérive passive», testé pour les facteurs «salinité 35 et gravier»

Vitesse du courant (z=5 cm)	Rang moyen	Somme des rangs	Moyenne	Écart-type
5 cm/s	3,100000	15,50000	10,50000	
5-20 cm/s	3,100000	15,50000	10,50000	
20 cm/s	2,300000	11,50000	11,40000	5,412947
20-30 cm/s	2,400000	12,00000	11,20000	4,919350
30 cm/s	4,100000	20,50000	15,60000	5,116151

Pas de différence significative entre les différentes vitesses de courant pour les facteurs «salinité 35 et gravier». ANOVA du Chi² (N = 5, dl = 4) = 4,425532 p <0,35147, coefficient de Concordance = 0,22128 et rang moyen r = r = 0,02660.

Annexe 5 : ANOVA de Friedman pour le Type de nage «perte de contrôle», testé pour les facteurs «salinité 15 et sable»

Vitesse du courant (z=5 cm)	Rang moyen	Somme des rangs	Moyenne	Écart-type
5 cm/s	4,300000	21,50000	10,50000	
5-20 cm/s	4,300000	21,50000	10,50000	
20 cm/s	2,600000	13,00000	10,50000	4,472136
20-30 cm/s	1,900000	9,50000	8,50000	
30 cm/s	1,900000	9,50000	8,50000	

Différence significative entre les différentes vitesses de courant pour les facteurs 'salinité 15' et 'sable'. ANOVA du Chi² (N = 5, dl = 4) = 15,28205 p < 0,00415, coefficient de Concordance = 0,76410 et rang moyen r = r = 0,70513.

Annexe 6: ANOVA de Friedman pour le Type de nage «perte de contrôle», testé pour les facteurs «salinité 15 et gravier»

Vitesse du courant (z=5 cm)	Rang moyen	Somme des rangs	Moyenne	Écart-type
5 cm/s	3,30	16,50	10,50	
5-20 cm/s	3,30	16,50	10,50	
20 cm/s	3,00	15,00	12,50	5,477226
20-30 cm/s	2,70	13,50	12,10	4,942166
30 cm/s	2,70	13,50	12,30	5,203364

Pas de différence significative entre les différentes vitesses de courant pour les facteurs 'salinité 15' et 'gravier'. ANOVA du Chi² (N = 5, dl = 4) = ,8089888 p < 0,93724, coefficient de Concordance = 0,04045 et rang moyen r = -0,1994.

Annexe 7 : ANOVA de Friedman pour le Type de nage «perte de contrôle», testé pour les facteurs «salinité 35 et sable»

Vitesse du courant (z=5 cm)	Rang moyen	Somme des rangs	Moyenne	Écart-type
5 cm/s	4,300000	21,50000	10,50000	
5-20 cm/s	4,300000	21,50000	10,50000	
20 cm/s	1,900000	9,50000	8,50000	
20-30 cm/s	1,900000	9,50000	8,50000	
30 cm/s	2,600000	13,00000	10,40000	4,248529

Différence significative entre les différentes vitesses de courant pour les facteurs 'salinité 35' et 'sable'. ANOVA du Chi² (N = 5, dl = 4) = 15,28205 p < 0,00415, coefficient de Concordance = 0,76410 et rang moyen r = 0,70513.

Annexe 8: ANOVA de Friedman pour le Type de nage «perte de contrôle», testé pour les facteurs «salinité 35 et gravier»

Vitesse du courant (z=5 cm)	Rang moyen	Somme des rangs	Moyenne	Écart-type
5 cm/s	3,700000	18,50000	10,50000	
5-20 cm/s	3,700000	18,50000	10,50000	
20 cm/s	2,200000	11,00000	10,50000	4,472136
20-30 cm/s	3,100000	15,50000	12,90000	6,035313
30 cm/s	2,300000	11,50000	10,80000	5,142956

Différence non significative entre les différentes vitesses de courant pour les facteurs 'salinité 35' et 'gravier'. ANOVA du Chi² (N = 5, dl = 4) = 4,988235 p < 0,28851, coefficient de Concordance = 0,24941 et rang moyen r = 0,06176.

Annexe 9: ANOVA de Friedman pour le Type de nage «ras au sol», testé pour les facteurs «salinité 15 et sable»

Vitesse du courant (z=5 cm)	Rang moyen	Somme des rangs	Moyenne	Écart-type
5 cm/s	2,500000	12,50000	8,10000	5,941380
5-20 cm/s	2,600000	13,00000	9,40000	5,759774
20 cm/s	3,100000	15,50000	11,50000	6,403124
20-30 cm/s	3,200000	16,00000	11,90000	3,577709
30 cm/s	3,600000	18,00000	11,80000	6,610598

Différence non significative entre les différentes vitesses de courant pour les facteurs 'salinité 15' et 'sable'. ANOVA du Chi² (N = 5, dl = 4) = 1,656566 p < 0,79859, coefficient de Concordance = 0,08283 et rang moyen r = -0,1465

Annexe 10: ANOVA de Friedman pour le Type de nage «ras au sol», testé pour les facteurs «salinité 15 et gravier»

Vitesse du courant (z=5 cm)	Rang moyen	Somme des rangs	Moyenne	Écart-type
5 cm/s	2,400000	12,00000	10,60000	4,449719
5-20 cm/s	3,500000	17,50000	12,90000	6,188699
20 cm/s	3,400000	17,00000	12,10000	7,144928
20-30 cm/s	2,800000	14,00000	12,20000	6,476882
30 cm/s	2,900000	14,50000	10,80000	5,310367

Différence non significative entre les différentes vitesses de courant pour les facteurs 'salinité 15' et 'gravier'. ANOVA du Chi² (N = 5, dl = 4) = 1,656566 p < 0,79859, coefficient de Concordance = 0,08283 et rang moyen r = -0,1465.

Annexe 11 : ANOVA de Friedman pour le Type de nage «ras au sol», testé pour les facteurs «salinité 35 et sable»

Vitesse du courant (z=5 cm)	Rang moyen	Somme des rangs	Moyenne	Écart-type
5 cm/s	3,200000	16,00000	9,40000	6,238990
5-20 cm/s	2,200000	11,00000	7,40000	3,560197
20 cm/s	3,200000	16,00000	9,90000	4,695743
20-30 cm/s	2,600000	13,00000	7,10000	3,577709
30 cm/s	3,800000	19,00000	10,80000	5,310367

Différence non significative entre les différentes vitesses de courant pour les facteurs 'salinité 35' et 'sable'. ANOVA du Chi² (N = 5, dl = 4) = 3,040000 p < 0,55115, coefficient de Concordance = 0,15200 et rang moyen r = -0,0600.

Annexe 12: ANOVA de Friedman pour le Type de nage «ras au sol», testé pour les facteurs «salinité 35 et gravier»

Vitesse du courant (z=5 cm)	Rang moyen	Somme des rangs	Moyenne	Écart-type
5 cm/s	3,600000	18,00000	13,90000	6,328507
5-20 cm/s	3,400000	17,00000	12,30000	6,704476
20 cm/s	2,200000	11,00000	8,50000	4,949747
20-30 cm/s	3,000000	15,00000	10,80000	7,276675
30 cm/s	2,800000	14,00000	8,60000	3,577709

Différence non significative entre les différentes vitesses de courant pour les facteurs 'salinité 35' et 'gravier'. ANOVA du Chi² (N = 5, dl = 4) = 2,400000 p < 0,66263, coefficient de Concordance = 0,12000 et rang moyen r = -0,1000.

VITESSE DE CISAILLEMENT

La vitesse de cisaillement (u^*) dans le canal hydrodynamique a été estimée par la formule de Von Karman-Prandtl (tableau 14), qui décrit une relation de type logarithmique entre la vitesse horizontale et la hauteur au-dessus du sédiment dans la couche limite de fond. Une description de la formule se retrouve en détail dans la section « Recommandations pour la gestion de la plie rouge juvénile » de ce même texte. La vitesse de l'écoulement en couche limite benthique dépend de sa vitesse libre U_∞ au sommet de la couche limite, mais aussi de la friction avec le fond z_0 . Selon cette estimation, u^* pour le sédiment grossier est 16% plus élevé que u^* pour le sédiment fin, donc la distance qui les sépare augmente avec l'augmentation du courant (tableau 14). Cette différence entre u^* pour le sédiment fin et le sédiment grossier est faible pour 5 cm/s, donc peu d'effet du sédiment sur la vitesse du courant de la couche limite (tableau 14). Aussi, u^* pour le sédiment fin à 30 cm/s correspond au u^* pour le sédiment grossier à 25 cm/s. Cependant, cet effet du sédiment ne semble pas influencer les résultats de l'effet du courant. En effet, lorsque le graphique des plies sortant de la zone expérimentale (présenté dans l'article scientifique) est étudié en fonction des u^* , l'effet combiné du courant et du sédiment est maintenu.

Annexe 13: estimation de la vitesse de cisaillement (cm/s) avec la formule Karman-Prandtl selon les deux sédiments et la vitesse de courant à z=5 cm

	Sédiment fin			Sédiment grossier		
	5	20	30	5	20	30
Vitesse <i>free flow</i> U mesurée à Z=5 cm (cm/s)						
Vitesse de cisaillement u* (cm/s)	0,30	1,19	1,78	0,36	1,43	2,14

CALCUL DE LA VITESSE DE CISAILLEMENT EN MILIEU NATUREL

Le calcul de u^* en milieu naturel peut être fait de deux façons, et doit être calculé pour les différents stades de la marée. La première méthode s'effectue en ayant une donnée de vitesse de courant dans les premiers 15% du niveau d'eau à partir du fond (Bergeron et Abrahams, 1992), et la médiane des données de diamètre de grain du sédiment de surface, l'équation de Von Karman-Prandtl peut être utilisée. D'ailleurs, u^* dans les expériences du canal ont été calculés de cette façon pour les expériences dans le canal hydrodynamique (tableau 14).

ÉQUATION DE VON KARMAN-PRANDTL

$$u^* = (0,41 \times U_z) / (\ln Z - \ln Z_0)$$

où

u^* = vitesse de cisaillement

0,41 = constante de Karman-Prandtl

U_z = vitesse du courant mesurée à la hauteur Z mesurée à partir du fond

Z_0 = $(0,08 \times \text{diamètre de grain médian})$

La deuxième méthode de calcul de u^* en milieu naturel implique l'acquisition d'au minimum deux points de vitesse de courant situés au maximum 15% de la hauteur de la colonne d'eau à partir du fond, pris simultanément. Une régression de u , la vitesse de courant sur $\ln Z$, Z étant la profondeur à partir du fond doit être effectuée afin de trouver l'ordonnée à l'origine, qui correspond à Z_0 dans l'équation de Von Karman-Prandtl.

POSITION DES PLIES DANS LA ZONE EXPÉRIMENTALE

Lors de nos expériences, nous avons noté que les juvéniles passaient significativement plus de temps dans les 5 cm du bord des quatre limites de la zone expérimentale que dans la partie centrale (tableau 15). Nous pensons que les plies, au début de la période d'acclimatation de 16 heures où les poissons étaient restreints dans la zone expérimentale par des barrières, étaient très actives et tentaient de sortir. Lorsqu'elles devenaient moins actives, elles se déposaient près des barrières, au même endroit où elles essayaient de sortir. Une nuit d'acclimatation était nécessaire afin de commencer l'expérience avec des poissons calmes. Le facteur stress était peut-être aussi plus grand dans le centre de la zone expérimentale, plus visible et plus exposée que proche des rebords.

Selon Redjah et al. (2010), qui ont caractérisé le canal hydrodynamique utilisé, la vitesse de cisaillement (u^*) est plus grande sur les bords externes et décroît jusqu'aux bords internes. Elle est également plus grande en amont de la zone expérimentale qu'en aval, lorsque mesuré à vitesse moyenne de 15 cm/s, ce qui serait causé par la friction engendrée par le mouvement de l'eau sur les rebords. Cependant, cette variabilité de u^* est faible et ne dépasse pas 10%, donc nous ne pensons pas que la position des plis dans la zone expérimentale ait pu modifier les résultats sur leur comportement.

Annexe 14 : Table de PERMANOVA des budgets-temps selon la position dans la zone expérimentale

Source	Degrés liberté	SS	MS	Pseudo-F	P(perm)	Permutations
Position	1	22,977	22,977	714,7	0,0001	9834
Résidus	196	6,301	3,214 E-2			
Total	197	29,278				

La matrice a été créée avec la distance euclidienne, sur une base de données non transformées. L'homogénéité des variances a été testée avec Permdisp (0,79).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABLE, K.W. et FAHAY, M.P. 1998. « First year in the life of estuarine fishes in the middle Atlantic Bight ». *Estuaries*, volume 22, pp. 337-338.
- AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA. 2009. « Plie rouge - *Pseudopleuronectes americanus* ». En ligne. <<http://www.agr.gc.ca/fra/industrie-marches-et-commerce/statistiques-et-information-sur-les-marches/par-produit-secteur/poissons-et-fruits-de-mer/poissons-et-fruits-de-mer-industrie-canadienne/feuilles-de-renseignements/plie-rouge/?id=1383580252105>> Consulté le 10 mars 2015.
- ARNOLD, G.P. 1969. « The reactions of the plaice (*Pleuronectes platessa* L.) to water currents ». *Journal of Experimental Biology*, volume 51, pp. 681-697.
- ARNOLD, G. P. 1974. « Rheotropism in fishes ». *Biological reviews*, volume 49, pp. 515-576.
- ARNOLD, G. P. et WEIHS, D. 1978. « The hydrodynamics of rheotaxis in the plaice (*Pleuronectes platessa* L.) ». *Journal of Experimental Biology*, volume 75, pp. 147-169.
- Atlantic States Marine Fisheries Commission. 2012. « Species Profile: Winter Flounder Depleted SNE/MA Stock in Early Stages of Rebuilding » ASMFC Fisheries Focus, volume 21, pp.4-9 .
- AUDET, C. et TREMBLAY, R. 2011. « Production of flounder (Pleuronectiformes) in eastern North America: biological issues ». *Canadian Journal of Zoology*, volume 89, pp. 612-621.
- BEN KHEMIS, I., DE LA NOUE, J. et 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*, volume 89, pp. 377-386.
- BERGERON, N.E. et ABRAHAM, A.D. 1992. « Estimating shear velocity and roughness length from velocity profiles ». *Water Resources Research*, volume 28, pp. 2155-2158.

- BURROWS, M.T., GIBSON, R.N. et MACLEAN, A. 1994. « Effects of endogenous rhythms and light conditions on foraging and predator-avoidance in juvenile plaice ». *Journal of Fish Biology*, volume 45, pp.171-180.
- CHAMPALBERT G., CASTELBON, C., LE DIREACH-BOURSIER, L., MACQUART-MOULIN, C. et PATRILT, G. 1990. « Experimental study of swimming activity and orientation of sole (*Solea solea* L.) larvae and juveniles: influence of endogenous rhythm, light, gravity, temperature and feeding ». *Mer*, volume 28, pp.248-254.
- CHAMPALBERT G. et MARCHAND, J. 1994. « Rheotaxis in larvae and juvenile sole (*Solea solea* L.): influence of light conditions and sediment ». *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, volume 177, pp.235-249.
- CHAMPALBERT, G., MARCHAND, J., et LE CAMPION, J. 1994. « Rheotaxis in juvenile sole *Solea solea* (L.): influence of salinity and light conditions ». *Netherlands Journal of Sea Research*, volume 32, pp. 309-319.
- DE VEEN, J.F. 1978. « On selective tidal transport in the migration of North Sea plaice (*Pleuronectes platessa*) and other flatfish species ». *Netherlands Journal of Sea Research*, volume 12, pp.115-147.
- DECELLES, G.R. et CADRIN, S.X. (2010). « Movement patterns of winter flounder (*Pseudopleuronectes americanus*) in the southern Gulf of Maine: observations with the use of passive acoustic telemetry ». *Fishery Bulletin*, volume 108, pp. 408-419.
- DOMENICI, P. et KAPOOR, B.G. 2010. « Fish locomotion: an eco-ethological perspective ». *Science Publishers*. 512 p.
- ELLIS, T., HOWELL, B.R. et HUGHES, R.N. 1997. « The cryptic responses of hatchery-reared sole to a natural sand substratum ». *Journal of Fish Biology*. volume 51, pp. 389-401.
- FAIRCHILD, E.A. 2010. « Culture of winter flounder. In: *Practical Flatfish Culture and Stock Enhancement* ». *Wiley-Blackwell Publishing Ames, IA*, pp. 101-122

- FAIRCHILD, E.A. 2013. « Bringing winter flounder back to Martha's Vineyard through community engagement ». University of New Hampshire (New Hampshire Sea Grant). NHU-G-13-001. En ligne. <<http://www.nmt.us/news/vineyardflounderstocking.pdf>>.
- FAIRCHILD, E.A., FLECK, J. et 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*, volume 36, pp. 1374-1383.
- FAIRCHILD, E.A. et HOWELL, W.H. 2004. « Factors affecting the post-release survival of cultured juvenile *Pseudopleuronectes americanus* ». *Journal of Fish Biology*, volume 65, pp. 69-87.
- FAIRCHILD, E.A., RENNELS, N., et HOWELL, H. 2009. « Using telemetry to monitor movements and habitat use of cultured and wild juvenile winter flounder in a shallow estuary ». Dans *Tagging and Tracking of Marine Animals with Electronic Devices*, Springer Netherlands, pp. 5-22.
- FAIRCHILD, E.A., SULIKOWSKI, J., RENNELS, N., HOWELL, W.H., et GURSHIN, C.W. 2008. « Distribution of winter flounder, *Pseudopleuronectes americanus*, in the Hampton–Seabrook Estuary, New Hampshire: observations from a field study ». *Estuaries and Coasts*, volume 31, pp. 1158-1173.
- FISHERIES AND OCEANS CANADA. 2012. « Assessment of winter flounder (*Pseudopleuronectes americanus*) in the southern gulf of St. Lawrence (NAFO div. 4t), Canadian Science Advisory Secretariat Science Advisory Report 2012/016 ». En ligne. <www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/Publications/SAR-AS/2012/2012_016-eng.pdf> Consulté le 1 mars 2015.
- FISHWATCH. 2014. « US Seafood Facts: Winter Flounder ». En ligne. <<http://www.fishwatch.gov/profiles/winter-flounder>> Consulté le 1 mars 2015.
- GERSTNER, C.L. et WEBB, P.W. 1998. « The station-holding performance of the plaice *Pleuronectes platessa* on artificial substratum ripples ». *Canadian Journal of Zoology*. volume 76, pp. 260-268.
- GIBSON, R.N. 1980. « A quantitative description of the behaviour of wild juvenile plaice (*Pleuronectes platessa* L.) ». *Animal Behaviour*, volume 28, pp.1202-1216.

- GIBSON, R.N. 1994. « Impact of habitat quality and quantity on the recruitment of juvenile flatfishes ». *Netherlands Journal of Sea Research*, volume 32, pp. 191-206.
- GIBSON, R.N. et ROBB, L. 1992. « The relationship between body size, sediment grain size and the burying ability of juvenile plaice, *Pleuronectes platessa* L. ». *Journal of Fish Biology*, volume 40, pp.771-778.
- GIBSON R.N. et ROBB, L. 2000. « Sediment selection in juvenile plaice and its behavioural basis ». *Journal of Fish Biology*, volume 56, pp.1258-1275.
- GIBSON, R.N., STONER, A.W., RYER, C.H. 2005. « The behaviour of flatfishes ». Dans *Flatfishes: biology and exploitation*, Blackwell Science, pp.213-239.
- GOLDBERG, R., PHELAN, B., PEREIRA, J., HAGAN, S., CLARK, P., BEJDA, A., CALABRESE, A., STUDHOLME, A. et ABLE, K.W. 2002. « Variability in habitat use by young-of-the-year winter flounder, *Pseudopleuronectes americanus*, in three northeastern US estuaries ». *Estuaries*, volume 25, pp.215-226.
- GREER-WALKER, M., HARDEN JONES, F.R. et ARNOLD, G.P. 1978. « The movements of plaice (*Pleuronectes platessa* L.) tracked in the open sea ». *ICES Journal of Marine Science*, volume 39, pp.58-86.
- HECK, K.L., ABLE, K.W., FAHAY, M.P. et ROMAN, C.T. 1989. « Fishes and decapod crustaceans of Cape Cod eelgrass meadows: species composition, seasonal abundance patterns and comparison with unvegetated substrates ». *Estuaries*, volume 12, pp.59-65.
- HOWELL, B.R. et CANARIO, A.V.M. 1987. « The influence of sand on the estimation of resting metabolic rate of juvenile sole, *Solea solea* (L.) ». *Journal of Fish Biology*, volume 31, pp.277-280.
- JOAQUIM, N., WAGNER, G.N. et GAMPERL, A.K. 2004. « Cardiac function and critical swimming speed of the winter flounder (*Pleuronectes americanus*) at two temperatures ». *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, volume 138, pp.277-285.

- JOLY, S. 2004. « Impact du substrat et de la photopériode sur des juvéniles de plie rouge *Pseudopleuronectes americanus* ». Mémoire déposé à l'Université du Québec à Rimouski.
- KEEFE, M., et ABLE, K.W. 1994. « Contributions of abiotic and biotic factors to settlement in summer flounder, *Paralichthys dentatus* ». *Copeia*, volume 1994, pp.458-465.
- KELLISON, G.T., EGGLESTON, D.B. et BURKE, J.S. 2000. « Comparative behaviour and survival of hatchery-reared versus wild summer flounder (*Paralichthys dentatus*) ». *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, volume 57, pp.1870-1877.
- KIEFFER, J.D., ARSENAULT, L.M. et LITVAK, M.K. 2009. « Behaviour and performance of juvenile shortnose sturgeon *Acipenser brevirostrum* at different water velocities ». *Journal of Fish Biology*, volume 74, pp.674-682.
- LAZZARI, M.A., 2015. « Eelgrass, *Zostera marina*, as essential fish habitat for young-of-the-year winter flounder, *Pseudopleuronectes americanus* (Walbaum, 1792) in Maine estuaries ». *Journal of Applied Ichthyology*, volume 31, pp.459-465.
- MACQUART-MOULIN, C., CHAMPALBERT, G., HOWELL, B.R., PATRITI, G. et RAVAIVOSON, C. 1991. « La relation alimentation-fixation benthique chez les jeunes soles *Solea solea* L. métamorphosées ». Evidences expérimentales. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, volume 153, pp.195-205.
- MALLOY, K.D. et TARGETT, T.E. 1991. « Feeding, growth and survival of juvenile summer flounder *Paralichthys dentatus*: experimental analysis of the effects of temperature and salinity ». *Marine Ecology Progress Series*, volume 72, pp.213-223.
- MANDERSON, J.P., PHELAN, B.A., STONER, A.W. et HILBERT, J. 2000. « Predator-prey relations between age-1+ summer flounder (*Paralichthys dentatus*, *Linnaeus*) and age-0 winter flounder (*Pseudopleuronectes americanus*, *Walbaum*): predator diets, prey selection, and effects of sediments and macrophytes ». *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, volume 251, pp.17-39.

- MCCRACKEN, F.D. 1963. « Seasonal movements of the winter flounder, *Pseudopleuronectes americanus* (Walbaum), on the Atlantic coast ». Journal of the Fisheries Board of Canada, volume 20, pp.551-586.
- MENG, L., CICCETTI, G. et RACITI, S. 2005. « Relationships between juvenile winter flounder and multiple-scale habitat variation in Narragansett Bay, Rhode Island ». Transactions of the American Fisheries Society, volume 134, pp.1509-1519.
- MOLES, A. et NORCROSS, L.B. 1995. « Sediment preference in juvenile Pacific flatfishes ». Netherlands Journal of Sea Research, volume 34, pp.177-182.
- NASIR, N.A. et POXTON, M.G. 2001. « Substratum preferences of juvenile flatfish ». Cybium, volume 25, pp.109-117.
- OLIVIER, F., DESROY, N. et RETIÈRE, C. 1996 « Habitat selection and adult-recruit interactions in *Pectinaria koreni* (Malmgren) (Annelida: Polychaeta) post-larval populations: results of flume experiment ». Journal of Sea Research, volume 36, pp.217-226.
- PAPPAL, A.L., MACDONALD, D.G., et ROUNTREE, R.A. 2009. « Evidence of cobble habitat preference in age-0 winter flounder, *Pseudopleuronectes americanus* ». Marine and Freshwater Behaviour and Physiology, volume 42, pp. 43-53.
- PHELAN, B.A., MANDERSON, J.P., STONER, A.W. et BEJDA, A.J. 2001. « Size-related shifts in the habitat associations of young-of-the-year winter flounder (*Pseudopleuronectes americanus*): field observations and laboratory experiments with sediments and prey ». Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, volume 257, pp.297-315.
- POXTON, M.G. et NASIR, N.A. 1985. « The distribution and population dynamics of O-group plaice (*Pleuronectes platessa* L.) on nursery grounds in the Firth of Forth ». Estuarine, Coastal and Shelf Science, volume 21, pp.45-57.
- REDJAH, I., OLIVIER, F., MYRAND, B., PERNET, F., NEUMEIER, U. et CHEVARIE, L. 2010. « The importance of turbulent kinetic energy on transport of juvenile clams (*Mya arenaria*) ». Aquaculture, volume 307, pp. 1-2.

- ROGERS, S.I. 1992. « Environmental factors affecting the distribution of sole (*Solea solea* (L.) within a nursery area ». Netherlands Journal of Sea Research, volume 29, numéro 1, pp.153-161.
- SAUCERMAN, S. E. et DEEGAN, L.A. 1991. « Lateral and cross-channel movement of young-of-the year winter flounder (*Pseudopleuronectes americanus*) in Waquoit Bay, Massachusetts ». Estuaries, volume 14, numéro 4, pp. 440-446.
- SCOTT, W.B. et SCOTT, M.G. 1988. « Atlantic fishes of Canada ». Canadian Bulletin of Fisheries and Aquatic Sciences 219: 731 p.
- STONER, A.W., MANDERSON, J.P. et PESSUTTI, J.P. 2001. « Spatially explicit analysis of estuarine habitat for juvenile winter flounder: combining generalized additive models and geographic information systems ». Marine Ecology Progress Series, volume 213, pp.253-271.
- TANDA, M. 1990. « Studies on burying ability in sand and selection to the grain size for hatchery-reared marbled sole (*Limanda yokohamae*) and Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*) ». Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, volume 56, pp.1543-1548.
- TYLER, A.V. 1971. « Surges of winter flounder, *Pseudopleuronectes americanus*, into the intertidal zone ». Journal of the Fisheries Board of Canada, volume 11, pp.1727-32.
- VAGNER, M., DE MONTGOLFIER, B., SÉVIGNY, J.M., TREMBLAY, R. et AUDET, C. 2013. « Expression of genes involved in key metabolic processes during winter flounder (*Pseudopleuronectes americanus*) metamorphosis ». Canadian Journal of Zoology, volume 91, pp.156-163.
- WANAT, J.M. 2002. « Using habitat suitability models to identify essential fish habitat for the winter flounder, *Pseudopleuronectes americanus*, in great bay estuary ». Thèse de doctorat, University of New Hampshire.
- WEIHS, D. 1978. « Tidal stream transport as an efficient method for migration ». Journal du Conseil, volume 38, pp.92-99.
- WIRJOATMODJO, S. et PITCHER, T.J. 1984. « Flounders follow the tides to feed: evidence from ultrasonic tracking in an estuary ». Estuarine, coastal and shelf science, volume 19, pp. 231-241.

