



MÉMOIRE
PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN RESSOURCES RENOUVELABLES

PAR
CHANTALE GIRARD
B.SC.

VARIABILITÉ SPATIALE DE L'EMPREINTE ÉLÉMENTAIRE
DES OTOLITHES DE LARVES ET DE JUVÉNILES
DE PERCHAUDE (*PERCA FLAVESCENS*)
AU LAC SAINT-PIERRE, FLEUVE SAINT-LAURENT.

JANVIER 2012

RÉSUMÉ

Dès le milieu des années 1990, les débarquements commerciaux des perchaudes (*Perca flavescens*) du lac Saint-Pierre ont chuté très rapidement pour atteindre des niveaux extrêmement faibles à partir de 2008. Menaçant la survie de cette population, la rupture de l'abondance serait attribuable à plusieurs années consécutives d'une pression de pêche trop importante de même qu'à une succession de faibles cohortes, reliées à une baisse de la qualité des habitats et aux conditions environnementales défavorables. Puisque les mesures mises en œuvre par le MRNF et le MAPAQ pour réduire les prélèvements par la pêche n'offrent pas les effets escomptés, ces instances gouvernementales se tournent maintenant vers des actions susceptibles de favoriser la survie des jeunes stades et le recrutement de la perchaude, ainsi que dans l'identification de leurs sources de production.

Comme les otolithes enregistrent des informations uniques sur l'historique des poissons, l'analyse de leur empreinte élémentaire est très appropriée pour étudier la dynamique source-puits chez les populations de poissons en établissant la provenance des individus capturés. Bien que plusieurs études aient déjà prouvé que cette méthode d'analyse était utile pour définir les stocks de poissons en milieu marin, celle-ci demeure encore rarement utilisée en eaux douces.

L'objectif général de cette recherche consistait à évaluer la variabilité spatiale de l'empreinte élémentaire de l'otolithe des larves et des juvéniles de perchaude à l'intérieur du lac Saint-Pierre, le plus grand lac fluvial du Saint-Laurent. Puisqu'il présenterait plusieurs zones de productions de larves et des masses d'eaux contrastées, le lac Saint-Pierre constitue un milieu très intéressant pour ce genre d'étude. Des analyses sur le cœur des otolithes de perchaudes aux stades larvaire et juvénile ont été réalisées par ablation au laser et à l'aide d'un spectromètre de masse couplé à un plasma inductif (LA-ICPMS). Ces jeunes poissons ont été capturés dans cinq zones de production connues du lac Saint-Pierre et comparés à une station située en aval dans le secteur de Beaumont, près de Québec. Considérant le cœur de l'otolithe comme un indicateur de l'origine du spécimen, l'empreinte élémentaire du lieu d'émergence a été caractérisée à partir du Ca ainsi que de 14 autres éléments traces.

Les données ont été analysées selon une approche univariée (ANOVA) et multivariée (MANOVA, analyse de la fonction linéaire discriminante et estimation du maximum de vraisemblance). Dans un premier temps, à partir de l'analyse des éléments traces présents à l'intérieur des otolithes des larves de perchaudes, il a été établi que cinq des éléments analysés différaient entre eux de façon significative, soit le B, K, Mg, Sr et

Ba. À partir d'un modèle bâti avec ces cinq éléments, il a été déterminé que l'empreinte élémentaire était distincte non seulement entre les cinq zones de production échantillonnées au lac Saint-Pierre, mais aussi avec celle de la station de Beaumont. En se basant sur ce modèle, il est possible de discriminer les sites de capture avec un succès de reclassification de 69 %. Ces résultats sont très convaincants, compte-tenu de l'étendue relativement restreinte du lac Saint-Pierre. Dans un deuxième temps, une vérification de la possibilité d'établir un lien de connectivité entre les larves et les juvéniles ayant survécu à une première saison de croissance a été réalisée. Afin de déterminer le lieu d'éclosion des juvéniles, leurs signatures géochimiques ont été comparées à celles des larves, qui constituaient les références. Ces analyses ont révélé que les juvéniles proviendraient à plus de 76 % de trois des zones de production échantillonnées, soit Yamachiche, Nicolet et Girodeau. En établissant si ce patron demeure stable dans le temps, cela pourrait orienter les mesures de gestion, par exemple, en concentrant la protection de certains secteurs particulièrement favorables, afin d'assurer le rétablissement de la population de perchaude du lac Saint-Pierre.

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier mon directeur M. Pascal Sirois et mon codirecteur M. Marc Mingelbier, d'abord pour m'avoir démontré une grande confiance en me laissant le soin de réaliser ce magnifique projet, mais aussi pour leur appui et leur compréhension tout au long de ce périple. Même si la grande joie de devenir mère a rendu le parcours un peu plus long et plus complexe, ces hommes exceptionnels ont toujours su me démontrer tout leur soutien.

Un merci tout spécial à Anne-Lise Fortin pour ses judicieux conseils et nos conversations téléphoniques régulières qui m'ont aidée à me tenir à jour malgré la distance. Je souhaite souligner l'aide précieuse que m'a apportée Philippe Brodeur, biologiste au ministère des Ressources naturelles et de la Faune à Trois-Rivières. Merci beaucoup à Dany Savard et à Paul Bédard du laboratoire des Matériaux Terrestres et à ma collègue Joëlle Guérin pour leurs judicieux conseils et leur expertise au niveau du LA-ICPMS. Je désire remercier Isabelle Poirier pour son aide au niveau du laboratoire. Merci aussi à ceux qui ont participé à toute la campagne d'échantillonnage du lac Saint-Pierre et au tri des échantillons : Benjamin Jacob, Simon Beaulac, Geneviève Richard, Nicolas Auclair et particulièrement Rémi Bacon, technicien de la faune au ministère des Ressources naturelles et de la Faune à Trois-Rivières.

Je veux souligner la précieuse implication du ministère des Ressources naturelles et de la Faune au niveau du financement et de la logistique de terrain. Aussi, c'est en tant que récipiendaire d'une bourse pour les études supérieures que j'aimerais remercier le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada pour leur support financier.

Enfin, je tiens à remercier tout spécialement Michaël Cloutier, mon conjoint, dont l'amour et les encouragements ne sont pas étrangers à ma volonté de réussir. Je souhaite dire un gros merci à mon garçon Jérémy et à ma fille Mégan pour le bonheur qu'ils m'apportent chaque jour et qui représentent pour moi une source inépuisable de motivation. Un merci tout spécial à ma mère, sans qui je n'y serais sans doute jamais arrivée. Merci à toute ma famille et à ma belle-famille qui ont toujours trouvé le bon mot pour m'encourager.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	ii
REMERCIEMENTS.....	iv
TABLE DES MATIÈRES	v
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES FIGURES	viii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 MATÉRIEL ET MÉTHODES	10
2.1. SITE À L'ÉTUDE.....	11
2.2. ÉCHANTILLONNAGE.....	13
2.2.1. ENTREPOSAGE.....	15
2.3. LABORATOIRE.....	16
2.3.1. EXTRACTION DES OTOLITHES	16
2.3.2. PRÉPARATION DES OTOLITHES	18
2.3.3. ANALYSE DE L'EMPREINTE ÉLÉMENTAIRE	19
2.3.4. SPECTRE POUR ÉTABLIR L'EMPREINTE ÉLÉMENTAIRE.....	23
2.5. ANALYSES STATISTIQUES	25
2.5.1. EMPREINTES ÉLÉMENTAIRES DES LARVES.....	25
2.5.2. ORIGINES DES JUVÉNILES	27
CHAPITRE 3 RÉSULTATS	29
3.1. EMPREINTES ÉLÉMENTAIRES DES LARVES	30
3.2. CONNECTIVITÉ ENTRE LES JUVÉNILES ET LES LARVES	36
CHAPITRE 4 DISCUSSION	39
CHAPITRE 5 CONCLUSION	49
BIBLIOGRAPHIE.....	52
ANNEXES.....	62

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Longueur standard moyenne (mm) des perchaudes pour les analyses de l’empreinte élémentaire a) des larves et b) des juvéniles en fonction de la zone de production (les moyennes de longueur qui diffèrent significativement entre elles sont indiquées en exposant par une lettre distincte, test <i>a posteriori</i> de Tukey, ANOVA $P < 0,001$).....	14
Tableau 2.	Paramètres d’opération du système de LA-ICPMS.....	21
Tableau 3.	Limites de détection (LD) et coefficient de variation moyens (CV) des éléments conservés pour les analyses de l’empreinte élémentaire a) des larves et b) des juvéniles	25
Tableau 4.	Résultats de la MANOVA par paires de sites, statistiques de la trace de Pillai (correction de Bonferroni, $\alpha < 0,0033$)	32
Tableau 5.	Précision de la classification d’après la technique du « jacknife », du nombre d’échantillons de perchaudes identifiées à son site de capture réel basé sur l’analyse de la fonction linéaire discriminante de l’empreinte élémentaire du cœur de l’otolithe des larves avec cinq éléments explicatifs (B, Mg, K, Sr et Ba)	34
Tableau 6.	L’effet de la régression pas-à-pas des variables sur la concordance de la reclassification des larves de perchaudes basée sur l’empreinte élémentaire de l’otolithe utilisée dans l’analyse de la fonction linéaire discriminante (AFLD)	35
Tableau 7.	Résultats de l’estimation du maximum de vraisemblance pour a) les larves et b) les juvéniles d’origine inconnue de perchaudes du lac Saint-Pierre	36
Tableau 8.	Contributions estimées (erreur-type) en pourcentage par zone de production à l’aide de la méthode du maximum de vraisemblance pour les juvéniles de perchaudes du lac Saint-Pierre	38
Tableau 9.	Coordonnées géographiques des stations d’échantillonnage utilisées pour l’empreinte élémentaire des larves au lac Saint-Pierre en 2007.....	63

Tableau 10. Coordonnées géographiques des stations d'échantillonnage utilisées pour l'empreinte élémentaire des larves dans le secteur de Beaumont en 2007.....65

Tableau 11. Coordonnées géographiques des stations d'échantillonnage utilisées pour la connectivité entre les juvéniles et les larves au lac Saint-Pierre en 2007.....67

LISTE DES FIGURES

- Figure 1. Image satellite du lac Saint-Pierre (Environnement Canada, 2011).....3
- Figure 2. Carte indiquant les zones de production échantillonnées à l'intérieur du lac Saint-Pierre et la station du secteur de Beaumont 11
- Figure 3. Exemple d'un cratère d'ablation sur un otolithe (coupe sagittale).22
- Figure 4. Concentrations moyennes avec erreurs-types des éléments par zone de production pour l'empreinte élémentaire des larves du lac Saint-Pierre, la ligne pointillée indiquant la limite de détection moyenne sauf pour le Sr dont la limite de détection se confond avec l'abscisse (pour chaque élément, les concentrations moyennes présentant une différence significative entre les zones sont indiquées par des lettres distinctes, anova $P < 0,001$)31
- Figure 5. Représentation graphique des deux premières variables canoniques basées sur l'analyse de la fonction linéaire discriminante pour un modèle bâti à partir de cinq éléments, soit B, Mg, K, Sr et Ba pour l'empreinte élémentaire des larves. Les symboles vides représentent les stations de la rive sud et les symboles pleins, les stations de la rive nord. (ellipse des bornes d'intervalles de confiance des moyennes à 95 %).33

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Le recrutement, c'est-à-dire le nouvel apport de juvéniles qui vient s'ajouter aux stocks de poissons annuellement, est un processus de grande importance, car il contribue à compenser les pertes engendrées par les morts naturelles et les captures. C'est pourquoi, les événements qui marquent les premières étapes de la vie ont une influence critique sur les fluctuations des populations de poissons, autant dans les écosystèmes marins qu'en eaux douces (Chambers et Trippel, 1997; Fuiman et Werner, 2002). Ainsi, la survie des premiers stades du développement serait déterminante pour l'établissement de la force des classes d'âge de même que pour le recrutement, puisque la majorité des espèces subiraient un fort taux de mortalité au cours de cette période (Cushing, 1990; Houde, 1994; Leggett et Deblois, 1994).

Le Saint-Laurent est un écosystème complexe alimenté en amont par les Grands Lacs, possédant de nombreux tributaires d'origines diverses, et se jetant dans l'océan Atlantique. Il est composé de trois lacs fluviaux séparés par des tronçons étroits et rapides, un long estuaire fluvial, un estuaire moyen et un estuaire maritime suivi d'un golfe. La physiographie variable de la vallée du Saint-Laurent, couplée aux contrastes physicochimiques (Centre Saint-Laurent, 1996; Environnement Canada, 2011) de son réseau de tributaires génèrent des conditions d'habitat très hétérogènes, supportant naturellement une centaine d'espèces de poissons d'eau douce (La Violette et al., 2003). La composition chimique variable de ses masses d'eaux en éléments traces a d'ailleurs été démontrée à l'intérieur d'une étude publiée par Rondeau et al. (2005). Le Saint-Laurent a subi de nombreuses perturbations anthropiques survenues durant l'ère industrielle, dont

l'intensité varie dans l'espace et dans le temps (2007a; Côté et Morin, 2007b; La Violette, 2004; Morin et Bouchard, 2000; Morin et Côté, 2003).

Le plus grand lac fluvial du Saint-Laurent est le lac Saint-Pierre dont la vue aérienne (Figure 1) souligne de façon éloquentte l'existence de plusieurs masses d'eau très contrastées (Centre Saint-Laurent, 1996; Environnement Canada, 2011), provenant des divers tributaires qui l'alimentent. Comme le mélange latéral entre ces panaches est très réduit, il est possible de les distinguer sur une très longue distance (Centre Saint-Laurent, 1996). Des études publiées par Frenette et al. (2003; 2006) décrivent d'ailleurs trois principales masses d'eaux à l'intérieur du lac Saint-Pierre. La première longe la rive nord et

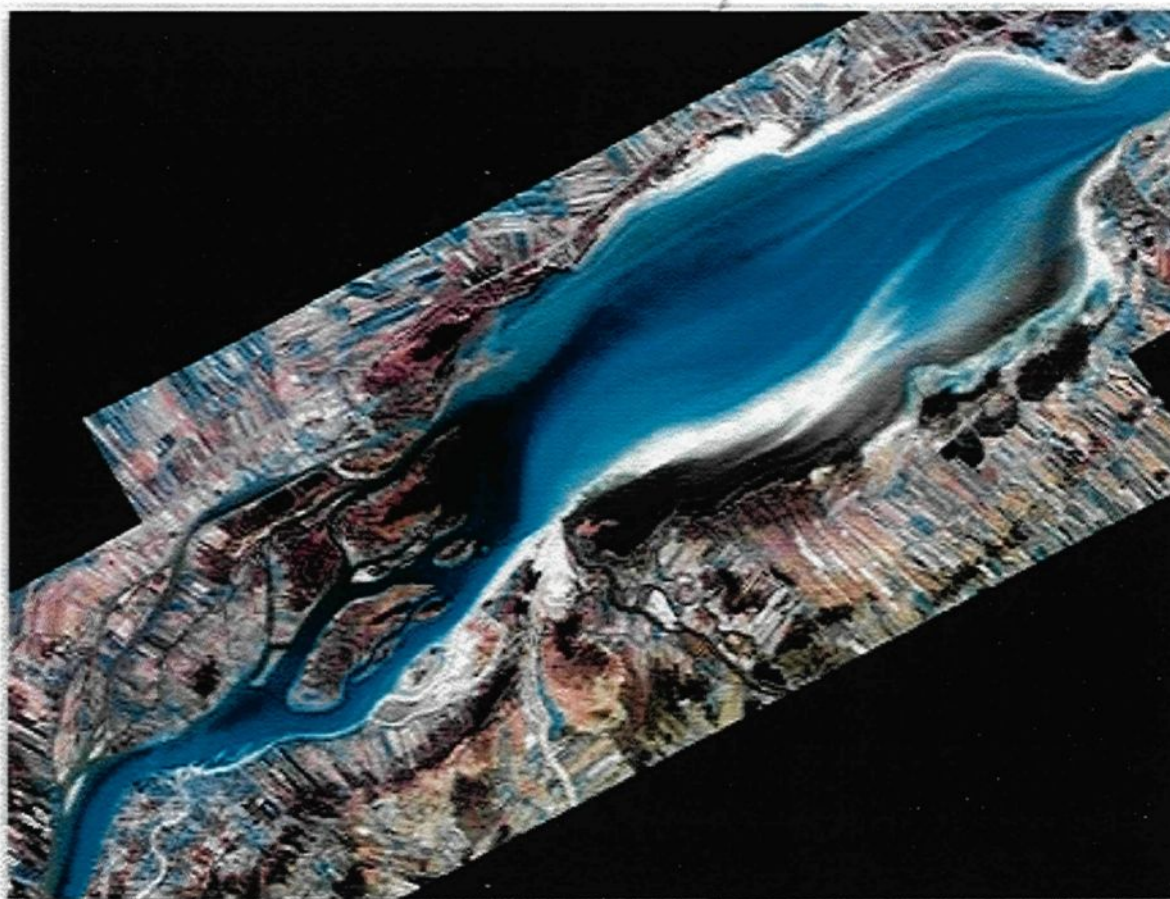


Figure 1. Image satellite du lac Saint-Pierre (Environnement Canada, 2011)

est influencée par les rivières des Outaouais, du Loup et Maskinongé, toutes trois caractéristiques des eaux du Bouclier Canadien. La seconde se compose des eaux provenant des Grands Lacs et occupe le centre du chenal de navigation. Enfin, la troisième masse d'eau qui suit la rive sud est marquée par les rivières Richelieu, Saint-François et Yamaska dont les terres en bordure ont une forte dominance agricole. Le lac Saint-Pierre se présente donc comme une juxtaposition de rivières qui coulent côtes à côtes (Frenette et al., 2006). Comme le mélange de ses masses d'eau demeure limité dans l'espace et qu'il varie dans le temps en raison des fortes crues saisonnières, les propriétés physiques et chimiques varient, affectant les processus biologiques clés (Wiens, 2002), les poissons et leur habitat.

Plusieurs espèces de poissons présentes au lac Saint-Pierre font l'objet d'une pêche commerciale ou sportive, notamment la perchaude, les dorés jaune et noir, l'esturgeon jaune, l'anguille d'Amérique et la barbotte brune. Parmi celles-ci, la perchaude (*Perca flavescens*) représente une composante socio-économique et écologique d'importance pour le lac Saint-Pierre (Bernatchez et Giroux, 1996; Magnan, 2002). En effet, en plus de constituer une espèce de grande importance au niveau du transfert énergétique dans le réseau alimentaire (Clapp et Dettmers, 2004), elle compte aussi parmi les espèces exploitées et prisées tant pour la pêche commerciale que sportive et ce, tout au long de l'année.

Dès les premiers inventaires de poissons relevés au lac Saint-Pierre (Cuerrier et al., 1946; Cuerrier, 1962), la perchaude figurait parmi les espèces les plus abondantes. Sa fragilité a cependant été soulevée dès la fin des années 1980 (Mailhot et al., 1987). Au cours de la décennie suivante, un rapport de Guénette et al. (1994) a démontré

l'effondrement imminent de la perchaude au lac Saint-Pierre. En effet, au cours des années qui ont suivi, la situation s'est considérablement détériorée, de sorte que les débarquements commerciaux, qui représentaient plus de 210 tonnes par an entre 1986 et 1994, n'en représentaient plus que le tiers (70 t) de 1995 à 1999 (Mailhot, 1999). La rupture de l'abondance, menaçant la survie de cette population de perchaude, serait attribuable à plusieurs années consécutives d'une pression de pêche trop importante de même qu'à une succession de faibles cohortes, reliées à une baisse de la qualité des habitats et aux conditions environnementales défavorables (Magnan, 2002). Jusqu'à maintenant, malgré l'adoption de plusieurs mesures gouvernementales visant à réduire l'impact de la pêche sur les populations de perchaudes, la situation de cette espèce au lac Saint-Pierre n'a connu aucune amélioration, forçant même plusieurs pêcheurs commerciaux à accrocher leurs filets et à participer à un programme de rachat de leurs permis par le gouvernement (Billette et al., 2010).

Puisque les mesures visant la réduction des prélèvements n'offrent pas les effets escomptés, et comme le problème semble se situer principalement au niveau du recrutement, les instances gouvernementales se tournent maintenant vers des actions susceptibles de favoriser la survie des jeunes stades. Conscients de l'importance que représente la population du lac Saint-Pierre, il est tout à leur avantage de connaître les facteurs qui influencent sa disponibilité au fil du temps pour arriver à mieux gérer cette fragile ressource. Puisqu'il a été démontré par des approches à la fois génétiques et morphologiques à l'intérieur de Leclerc et al. (2007; 2008), qu'il n'existe qu'un regroupement distinct de perchaudes temporellement stable du lac Saint-Pierre jusqu'à

Québec, il faut maintenant trouver une méthode alternative pour étudier le recrutement de la perchaude en fonction des divers habitats de reproduction.

Généralement, on distingue deux grandes catégories de méthodes d'identification chez les poissons. La première regroupe toutes les marques appliquées artificiellement sur le poisson, qu'elles soient internes, externes, électroniques, chimiques ou encore thermiques et qui permettent principalement de suivre le mouvement des poissons. La seconde regroupe toutes les marques d'origine naturelles pouvant être mises en évidence par l'analyse des structures morphologiques du poisson (écailles, nombre de vertèbres, rayons de nageoire, etc.), par l'étude d'inclusions issues de l'environnement (communautés de parasites, acides gras, éléments traces) ou encore par des analyses génétiques (Cadrin et al., 2005). L'analyse de la composition élémentaire de l'otolithe est l'une des méthodes d'identification qui suscite un intérêt particulier et qui est en plein essor depuis quelques années. En effet, elle représente une méthode d'avenir pour étudier la dynamique source-puits chez les populations de poissons, car elle permet d'établir et de vérifier la provenance des individus capturés.

L'otolithe, ce petit os se situant au niveau de l'oreille interne, représente une importante source d'information. Cette structure agit comme une boîte noire et permet de reconstituer la vie entière du poisson, et ce, de façon chronologique puisque sa croissance s'effectue par couches successives (Campana et Neilson, 1985). Comme les éléments présents dans l'environnement du poisson passent d'abord dans le sang par l'intermédiaire des branchies, puis dans le liquide endolymphatique, avant de se fixer à l'intérieur de la

matrice de carbonate de calcium et de protéines de l'otolithe, les processus physiologiques pourraient avoir une influence sur la fixation de certains éléments (Campana, 1999). Par contre, puisque l'otolithe est une structure métaboliquement inerte, les éléments qui y sont intégrés y demeurent inaltérés (Campana et Neilson, 1985).

Plusieurs études ont porté sur les processus d'acquisition et d'intégration des éléments traces à l'intérieur de l'otolithe (Campana et Neilson, 1985). Certaines ont tenté plus particulièrement de mettre en relation la composition élémentaire des otolithes avec celle de l'eau (Bath et al., 2000; Elsdon et Gillanders, 2003; Milton et Chenery, 2001). Il ressort que la proportion d'éléments traces à l'intérieur des otolithes ne correspond pas toujours directement avec celle de l'environnement et que l'intégration des éléments traces chez le poisson est un mécanisme complexe, largement influencé par la physiologie des poissons et dont certains aspects demeurent encore incompris. En effet, la variabilité de la température, de la salinité et de la composition chimique des différentes masses d'eaux peut aussi agir sur la concentration résultante. Les variations de concentrations à l'intérieur de l'otolithe pourraient donc être le résultat d'une combinaison de facteurs environnementaux et de facteurs physiologiques agissant sur le poisson (Arai et al., 2007).

Pour détecter des différences dans les empreintes élémentaires des otolithes de poissons, il est nécessaire que les spécimens aient été exposés à des conditions environnementales contrastées. La concentration des éléments trace peut être suivie dans le temps chez un même individu ou encore utilisée pour comparer des poissons capturés à différents endroits pour tenter d'identifier leur provenance. Dans ces cas, il devient possible

de retracer les habitats occupés et même d'identifier le lieu de naissance des poissons (Brazner et al., 2004b). Jusqu'à présent, l'empreinte élémentaire a surtout été utilisée en milieux marins (Brown, 2006; Campana et al., 2007; Clarke et al., 2009; Cook, 2011; Edmonds et al., 1991; Fodrie et Herzka, 2008; Gillanders et Kingsford, 1996; Humphreys Jr et al., 2005; Lawton et al., 2010; Rooker et al., 2002; Thorrold et al., 2007), dans certains estuaires (Bradbury et al., 2011; Brown, 2006; Gillanders et Kingsford, 1996; Hobbs et al., 2007; Swearer et al., 2003) et seulement quelques recherches comparables ont été menées en eaux douces avec succès (Brazner et al., 2004a; Brazner et al., 2004b; Fisher et al., 1999; Whitley, 2009; Zeigler et Whitley, 2010; Zeigler et Whitley, 2011; Zitek et al., 2010).

L'objectif général de cette recherche consiste donc à évaluer la variabilité spatiale de l'empreinte élémentaire de l'otolithe des larves et des juvéniles de perchaudes du lac Saint-Pierre. Dans un premier temps, à partir de l'analyse des éléments traces présents à l'intérieur des otolithes des larves de perchaudes, nous souhaitons déterminer s'il existe une distinction de l'empreinte élémentaire chez les larves issues de divers habitats de reproduction. En quelque sorte, cette première étape établirait la structure spatiale de référence représentant la signature géochimique des principaux groupes de larves échantillonnées au lac Saint-Pierre en 2007. Par la suite, nous comptons comparer les empreintes de naissance obtenues chez des jeunes recrues, c'est-à-dire, des juvéniles capturés en fin de saison avec les empreintes larvaires de référence pour établir leur lieu d'éclosion et mieux comprendre les mécanismes régissant la connectivité entre les larves et les juvéniles ayant survécu à une première saison de croissance.

Ce projet s'inscrit dans un programme de recherche plus large mené par le ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, qui vise une meilleure connaissance de la dynamique du recrutement de la perchaude au lac Saint-Pierre. Ainsi, en déterminant la contribution des différentes cohortes de perchaudes produites au printemps aux stocks de juvéniles qui exploitent la zone littorale du lac Saint-Pierre à l'automne, ces travaux pourront éventuellement offrir l'opportunité d'identifier certaines zones favorables au recrutement qu'il serait important de protéger pour maintenir et ultimement, rétablir la population de perchaude du lac Saint-Pierre.

CHAPITRE 2

MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. SITE À L'ÉTUDE

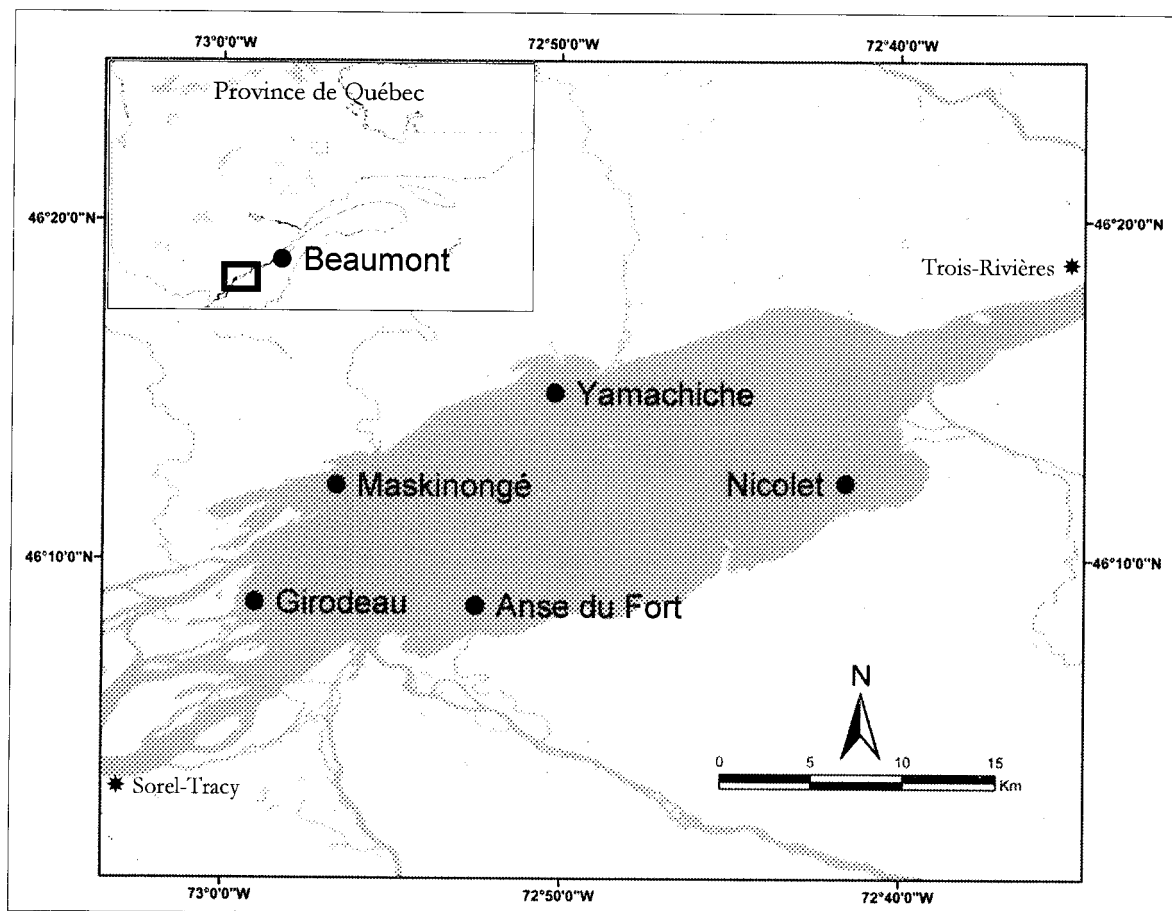


Figure 2. Carte indiquant les zones de production échantillonnées à l'intérieur du lac Saint-Pierre et la station du secteur de Beaumont

Le lac Saint-Pierre est situé au cœur des basses terres du Saint-Laurent à 46°12' de latitude Nord, à 72°50' de longitude Ouest et constitue la limite aval de tronçon fluvial du Saint-Laurent (Centre Saint-Laurent, 1996). À son embouchure, le débit moyen annuel est de 9 700 m³/s (Centre Saint-Laurent, 1996) et ses affluents contribuent à un accroissement de 8 % du débit total du fleuve (La Violette, 2004). Ses principaux affluents sont les rivières Richelieu (374 m³/s), Saint-François (219 m³/s), Yamaska (87 m³/s), Nicolet (77

m³/s), du Loup (27 m³/s) et Maskinongé (19 m³/s) (Ministère du Loisir de la Chasse et de la Pêche, 1983). Dernier élargissement majeur, il est le plus grand, mais le moins profond des trois lacs fluviaux. Il s'étend sur une longueur de 35 km et une largeur maximale de 15 km, pour une superficie totale d'environ 500 km² (Environnement Canada, 2010a). Sa profondeur moyenne est de 2,7 m (Carignan et Lorrain, 2000). Cependant, le chenal de navigation, une tranchée artificielle d'au moins 11,3 m de profondeur, le divise en deux. L'ouverture de cette voie de navigation a eu pour effet de concentrer le débit au centre du lac et par conséquent, de réduire la vitesse d'écoulement en périphérie (Morin et Côté, 2003). Ainsi, le temps de résidence des eaux est d'environ 20 heures à l'intérieur du chenal alors qu'il est de 3,2 jours près des rives (Carignan et Lorrain, 2000; Frenette et al., 1989). Son pourtour est constitué de rives basses régulières et de basses-terres marécageuses (Centre Saint-Laurent, 1996). Ce lac est bordé par la plus vaste plaine inondable en eaux douces du Québec, dont la superficie peut atteindre plus de 600 km² lors des périodes de fortes crues printanières (Environnement Canada, 2010a). Se démarquant par son environnement exceptionnel, principalement en raison de la grande biodiversité qui s'y retrouve, il est reconnu comme une Réserve mondiale écologique de la biosphère par l'UNESCO depuis novembre 2000. De plus, il figure sur la liste établie par la convention de Ramsar regroupant les zones humides d'importance internationale depuis 1998. À lui seul, le secteur du lac Saint-Pierre abrite 83 espèces de poissons ainsi que 288 espèces d'oiseaux (Langlois et al., 1992).

Pour cette étude, le secteur que nous avons désigné Beaumont se situe à l'intérieur de l'estuaire fluvial du Saint-Laurent, entre la pointe sud de l'île d'Orléans et la

municipalité de Beaumont. D'ouest en est, le chenal d'écoulement dans lequel se situe cette station présente une largeur variant de 2,5 à 5 km. Des travaux de dragages y maintiennent d'ailleurs une profondeur minimale de 12,5 m pour la navigation commerciale (Ministère du Conseil Exécutif, 1985). Ce secteur revêt une importance particulière dans le suivi des populations d'éperlans arc-en-ciel (*Osmerus mordax*) effectué par le ministère des Ressources naturelles et de la Faune (Trencia et Langevin, 2008). Ainsi, au cours du chalutage, il est fréquent que de jeunes perchaudes soient capturées. Comme ces perchaudes font partie du même réseau hydrographique et que selon Leclerc et al. (2007; 2008), elles appartiennent au même groupe génétique que les perchaudes du lac Saint-Pierre, ces dernières ont été utilisées aux fins de comparaison à l'intérieur de cette étude. Compte-tenu de la distance importante (environ 140 km) entre le lac Saint-Pierre et Beaumont ainsi que de la différence attendue dans la composition chimique des eaux entre les deux sites, nous voulons ainsi vérifier s'il existe une plus grande différence de l'empreinte élémentaire entre les deux sites qu'entre les diverses masses d'eau constituant le site d'étude principal.

2.2. ÉCHANTILLONNAGE

Les larves de perchaudes qui ont servi à cette étude proviennent de deux campagnes d'échantillonnages différentes. La première campagne résulte d'une pêche avec des chaluts propulsés (« push-net ») (ouverture de 0,4 m × 0,4 m, mailles de 500 µm) entre le 28 mai et

le 12 juin 2007, couvrant 220 stations réparties uniformément (tous les 700 m) et sur deux isobathes (80 cm et 120 cm) le long des rives du lac Saint-Pierre. Les 30 stations (ANNEXE 1) situées à l'intérieur de cinq des principales zones de production reconnues comme les plus productives au lac Saint-Pierre par le MRNF (la baie de Maskinongé, la baie de Yamachiche, au large de Nicolet et de l'île de la Girodeau ainsi qu'à l'intérieur de l'Anse du Fort) ont été utilisées. Les plus petits spécimens ont été sélectionnés aléatoirement pour s'assurer d'être le plus près possible des frayères (Tableau 1). La seconde campagne d'échantillonnage est constituée de larves recueillies sur 86 stations situées entre le pont de Québec et Montmagny, dont 13 ont été utilisées pour ce projet (ANNEXE 2).

Tableau 1. Longueur standard moyenne (mm) des perchaudes pour les analyses de l'empreinte élémentaire a) des larves et b) des juvéniles en fonction de la zone de production (les moyennes de longueur qui diffèrent significativement entre elles sont indiquées en exposant par une lettre distincte, test *a posteriori* de Tukey, ANOVA $P < 0,001$)

Zone de production	n	Longueur standard moyenne ±écart-type (mm)	Secteur
a) Larves			
Anse du Fort	10	10,38 ± 1,74 ^{AB}	Sud Ouest
Beaumont	21	7,13 ± 0,76 ^C	aval du lac St-Pierre
Girodeau	30	7,03 ± 1,20 ^C	Ouest
Maskinongé	28	10,48 ± 0,65 ^A	Nord Ouest
Nicolet	40	9,80 ± 0,64 ^B	Sud Est
Yamachiche	29	9,86 ± 0,79 ^B	Nord Est
b) Juvéniles			
Anse du Fort	20	56,54 ± 3,97 ^D	Sud Ouest
Girodeau	16	59,41 ± 3,11 ^D	Ouest
Maskinongé	19	47,84 ± 2,66 ^E	Nord Ouest
Nicolet	17	47,65 ± 3,30 ^E	Sud Est
Yamachiche	18	50,96 ± 4,59 ^E	Nord Est

Les perchaudes juvéniles utilisées pour cette étude proviennent d'une pêche au filet de type seine à poche (12,5 m de long × 4 m de haut, mailles de 3,2 mm) qui s'est déroulée du 16 au 22 octobre 2007 à l'intérieur des cinq principales zones de production connues du lac Saint-Pierre. Les spécimens ont été prélevés aléatoirement à l'intérieur de 25 des 40 stations échantillonnées au total (ANNEXE 3).

2.2.1. ENTREPOSAGE

Le potentiel de contamination des manipulations et de l'entreposage des spécimens destinés à servir aux analyses des éléments traces a fait l'objet de quelques études (Milton et Chenery, 1998; Proctor et Thresher, 1998). Selon ces dernières, la conservation des spécimens à l'intérieur de solutions telles que le formaldéhyde ou l'éthanol comporte le plus grand potentiel de contamination. L'extraction immédiate suivie d'un entreposage à sec serait, selon eux, la méthode à privilégier. Cependant, lorsque cela est impossible, la meilleure alternative serait la congélation immédiate.

De par sa nature, la perchaude établit ses aires de reproduction à l'intérieur des herbiers aquatiques du lac Saint-Pierre, ce qui complique les opérations de prélèvement. En effet, la végétation flottante et algale abonde dans les échantillons, ce qui nécessite un tri méticuleux afin d'en retirer toutes les larves. En raison de la diversité ichthyenne, les larves recueillies doivent ensuite être identifiées. Compte-tenu de la difficulté à pouvoir congeler ou encore à prélever les otolithes des larves de perchaudes au cours de l'échantillonnage,

nous avons choisi d'entreposer les spécimens dans une solution d'éthanol à 95 %. Le même traitement a été appliqué aux perchaudes juvéniles utilisées à l'intérieur de cette étude pour permettre la comparaison des empreintes élémentaires obtenues. D'après Hedges et al. (2004), ce type de conservation représente une bonne alternative puisque leurs tests n'ont révélé aucune influence de la pureté de l'éthanol ou du temps d'exposition sur des éléments importants comme le Sr et le Ba. De façon générale, les éléments qui sont fixés fortement à la structure cristalline de l'otolithe comme les Sr, Ba, Mn, Zn, Rb, et possiblement le Mg ne semblent pas subir l'influence des manipulations post-mortem. Par contre, les éléments régulés par des processus physiologiques, métaboliquement actifs ou encore faiblement liés à la matrice d'aragonite de l'otolithe comme les K, S, Cl et Na seraient plus susceptibles d'être affectés par les manipulations et la conservation des otolithes. Dans cette optique, un choix approprié des éléments à analyser s'impose.

2.3. LABORATOIRE

2.3.1. EXTRACTION DES OTOLITHES

Avant de procéder à l'extraction des otolithes, chaque spécimen a été mesuré (longueur totale et longueur standard). Les larves ont été mesurées sous une loupe binoculaire à l'aide d'un oculaire micrométrique alors que pour les juvéniles, nous avons utilisé un pied à coulisse. Nous n'avons conservé que les larves de moins de 12 mm de longueur totale, soit les plus jeunes spécimens, pour les analyses afin d'éviter que ces

dernières aient subi un transport passif ou actif à partir de leur site d'origine. Seules les perchaudes au stade juvénile, dont la longueur totale se situait entre 50 et 80 mm de longueur totale, ont été sélectionnées pour les analyses afin d'éviter une trop grande disparité dans la taille des spécimens.

Sous la loupe binoculaire, les otolithes des perchaudes ont été extraits puis nettoyés des tissus dans de l'eau déminéralisée en utilisant des pinces de Teflon pour les larves et des pinces de plastique pour les juvéniles. Pour une plus grande uniformité, nous avons choisi de prélever et d'analyser l'otolithe droit. Par contre, lorsque ce dernier a été perdu ou endommagé, le gauche a été prélevé en remplacement.

Les sagittae, ont été prélevées et manipulées à l'aide d'instruments non métalliques. Afin d'éviter toute contamination qui pourrait influencer les résultats des analyses de l'empreinte élémentaire, les instruments susceptibles d'entrer en contact avec les otolithes ont préalablement été lavés comme suit. Un premier nettoyage a été réalisé avec une solution de savon Nitrox 1%, suivi d'une immersion de 24 heures dans de l'acide nitrique (10%-13%). Le matériel a ensuite été immergé pendant 24 heures dans de l'eau déminéralisée. Après avoir été rincé trois fois avec de l'eau déminéralisée le matériel a finalement été déposé entre 24 et 48 heures dans une chambre propre de classe 100, sous une hotte à flux laminaire pour un séchage complet.

Suite au nettoyage des pinces enduites de Téflon selon la méthode décrite ci-haut, nous avons constaté que leur fragilité était trop grande et que le revêtement s'écaillait

facilement. Nous avons donc opté pour un simple lavage avec une solution de savon Nitrox 1 % suivi d'un triple rinçage à l'eau déminéralisée pour éviter d'endommager le revêtement protecteur.

2.3.2. PRÉPARATION DES OTOLITHES

Après un séchage complet, chaque otolithe de larves a été déposé sur une goutte de colle thermoplastique de type « Crystal Bond » de façon à ce que toutes les lames pétrographiques en comptent 91 au total. Les lames pétrographiques ont ensuite été rincées trois fois à l'eau déminéralisée, puis séchées dans une chambre propre de classe 100 sous une hotte à flux laminaire. Enfin, elles ont été rangées dans une boîte jusqu'à l'analyse à l'aide du spectromètre de masse couplé à un plasma inductif (Tableau 2).

Pour les juvéniles, une fois sec, chaque sagitta a été montée individuellement sur une lame de microscope à l'aide de la colle thermoplastique « Crystal Bond ». Les deux faces de tous les otolithes ont été sablés graduellement avec du papier d'un grain de 5 μm puis polis avec du 1 μm , de façon à exposer les couches centrales de l'otolithe sans en atteindre le noyau (primordium). Lors de cette étape, il importe de s'assurer d'effectuer un sablage uniforme sur chaque otolithe pour éviter qu'une partie du matériel destiné aux analyses en soit retiré, biaisant ainsi les résultats. Une fois le sablage complété, les sagittae droites ont été montées à l'aide de colle thermoplastique de type « Crystal Bond » de façon à ce que toutes les lames pétrographiques comptent 25 otolithes. Les lames ont alors été

rincées avec de l'eau déminéralisée puis plongées à l'intérieur d'un bain à ultrasons pour une période de cinq minutes. Ensuite, elles ont été rincées trois fois avec de l'eau déminéralisée afin de nettoyer la surface de toutes les impuretés. Enfin, elles ont été placées à l'intérieur d'une chambre propre de classe 100 sous une hotte à flux laminaire pendant 24 heures pour un séchage complet, puis rangées dans une boîte en vue de procéder aux analyses à l'aide d'un spectromètre de masse couplé à un plasma inductif (Tableau 2).

2.3.3. ANALYSE DE L'EMPREINTE ÉLÉMENTAIRE

Le choix de l'instrument, soit le spectromètre de masse couplé à un plasma inductif (ICPMS), pour effectuer l'analyse de l'empreinte élémentaire s'explique d'abord par le type traitement que nous souhaitons appliquer aux otolithes de nos spécimens. En effet, l'ICPMS est reconnu pour être un outil d'analyse puissant, en raison de sa grande sensibilité et de sa capacité à analyser plusieurs éléments et isotopes à la fois, et ce, même à partir d'un très petit volume de matériel (Arslan, 2005). Nous avons aussi cherché à déterminer quelle méthode d'analyse nous devions utiliser, soit par ablation au laser ou en solution. Certaines études ont d'ailleurs comparé les résultats obtenus par ICPMS en solution (SO) par rapport à ceux obtenus par ablation au laser (LA) lors d'analyses de la composition élémentaire de l'otolithe chez les larves de perchaude. Ainsi, Ludsin et al. (2006) démontrent qu'autant le SO- que le LA-ICPMS permet d'évaluer avec fiabilité les éléments plus abondants comme le Sr et le Ba. Cependant, ces derniers recommandent

l'ablation au laser pour l'analyse de la microchimie de l'otolithe chez les larves, car elle permettrait des mesures de concentrations plus précises de presque tous les éléments analysés et diminuerait les risques de contamination. Le laser permet aussi de cibler précisément la portion de l'otolithe correspondant à la période de croissance visée par l'étude. Ainsi, l'analyse du cœur de l'otolithe représente une mesure plus directe de l'origine du spécimen que celle de l'otolithe entier. Une étude publiée par Hedges et al. (2004), établit d'ailleurs que la dilution du matériel composant le cœur parmi le reste de l'otolithe et la dilution supplémentaire à l'intérieur d'une solution pourrait diminuer la capacité de détecter certains éléments, donc à établir l'empreinte élémentaire. Enfin, les résultats de Campana (1999) indiquent que non seulement la sensibilité de l'appareil permettrait l'identification d'une plus vaste étendue d'éléments, mais la précision obtenue par le biais de l'ablation au laser serait aussi significativement meilleure. Conséquemment, nous avons opté pour l'analyse à l'aide du faisceau laser plutôt qu'en solution.

Le choix des éléments analysés (Tableau 2) a été fait en fonction de ceux sélectionnés par Brazner et al. (2004a). Nous avons ensuite déterminé les isotopes à considérer à la suite d'une revue de littérature. À cela, nous avons ajouté le mercure qui est inclus dans les analyses du suivi de la qualité des eaux du fleuve Saint-Laurent (Environnement Canada, 2010b), en plus de la silice qui permet de reconnaître la portion du spectre où la lame pétrographique a été atteinte.

Tableau 2. Paramètres d'opération du système de LA-ICPMS

LASER	
Appareil :	New Wave
Type de laser :	Nd :YAG
Longueur d'onde :	213 nm
Énergie d'impulsion :	≈ 9 J/cm ²
Taux de répétition :	10 Hz
Taille du faisceau :	40 µm
Vitesse d'ablation :	1,2 µm/s (avec mise au point constante)
ICPMS	
Appareil :	Thermo Elemental X-7
Débit du gaz de transport :	1 L/min d'He (gaz de transport dans le laser) 0,7 L/min d'Ar (gaz du nébuliseur)
Temps de lecture par analytes :	10 ms
Isotopes mesurés :	¹¹ B, ²³ Na, ²⁴ Mg, ²⁷ Al, ²⁹ Si, ³⁹ K, ⁴³ Ca, ⁵⁵ Mn, ⁵⁶ Fe, ⁵⁷ Fe, ⁶³ Cu, ⁶⁵ Cu, ⁶⁴ Zn, ⁶⁶ Zn, ⁸⁶ Sr, ⁸⁷ Sr, ⁸⁸ Sr, ¹³⁷ Ba, ¹³⁸ Ba, ²⁰² Hg, ²⁰⁸ Pb.
Temps avant ablation :	20 s
Temps total d'acquisition :	Entre 65 et 140 s (larves) 140 s (Juvéniles)

Avant de procéder aux analyses, nous avons effectué des essais préliminaires sur des otolithes en surplus dans le but d'établir les paramètres optimaux d'utilisation du LA-ICPMS. Après comparaison, nous avons établi qu'un faisceau laser de 40 µm de diamètre était la plus petite taille présentant un signal perceptible. Aussi, puisque le taux d'ablation (matériel brûlé par le faisceau laser en fonction du temps) varie en fonction du matériel analysé, nous avons aussi effectué des tests qui nous ont permis d'obtenir un taux d'ablation moyen de 1,2 µm/s. Nous avons aussi effectué des mesures afin d'estimer l'épaisseur de l'otolithe dans le but de déterminer le temps d'ablation permettant de brûler la plus grande partie du cœur de l'otolithe.

Des études (Brophy et al., 2004; Ruttenberg et al., 2005) ont démontré que la concentration de certains éléments à l'intérieur du cœur de l'otolithe tendait à être plus élevée que dans les régions adjacentes. Lors de l'ablation, il importe alors de s'assurer de viser avec précision la zone correspondant au cœur de l'otolithe avec le laser afin d'obtenir des analyses comparables. Afin d'éviter tout biais, chaque otolithe analysé a été examiné minutieusement au microscope et tous ceux dont l'ablation ne correspondrait pas à la portion du cœur ont systématiquement été éliminés des analyses.

La calibration du LA-ICPMS a été réalisée à partir du matériel de référence certifié NIST-610 et MACS-3 distribué par l'Institut National des Standards et de la Technologie. Les valeurs disponibles du GP-4 ont pour leur part été utilisées à titre de référence. Un bloc de calibration comportant au moins une lecture sur chaque matériel de référence a été réalisé avant d'amorcer le traitement des otolithes, d'une à trois fois en cours de lecture puis après avoir complété l'analyse de l'ensemble des otolithes de la lame. Les cratères formés au cœur de chaque

otolithe ont un diamètre initial d'environ 40 μm et se présentent globalement sous la forme d'un cône inversé d'une profondeur variant entre 50 μm et 145 μm selon le temps d'ablation appliqué (Figure 3).

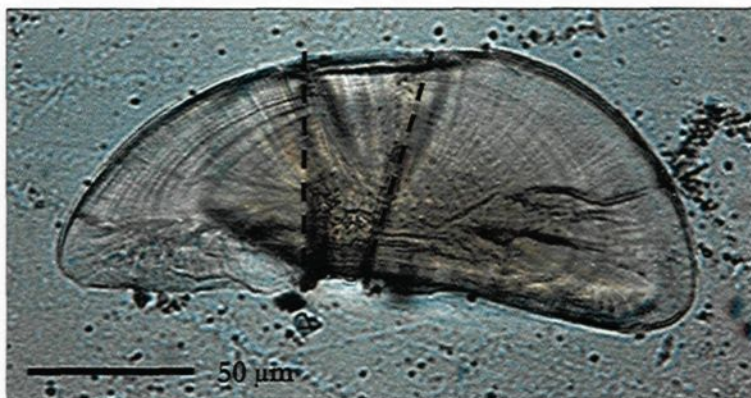


Figure 3. Exemple d'un cratère d'ablation sur un otolithe (coupe sagittale).

Le calcium a été utilisé comme standard interne avec une concentration normalisée à 39,6 % (396 000 ppm) (Ranaldi et Gagnon, 2008). Ce dernier n'a donc pas été inclus à l'intérieur des analyses statistiques visant à décrire l'empreinte élémentaire. Les limites de détections (ppm) ont été établies à une valeur équivalente à trois fois la déviation standard de la moyenne du blanc (bruit de fond) correspondant au compte de chaque isotope (Arai et Hirata, 2006).

La séquence des analyses a été répartie de façon aléatoire entre les sites d'échantillonnage afin d'éliminer le biais associé à la dérive de l'instrumentation, qui n'est pas considérée dans le contrôle des standards.

Enfin, le laser a subi une mise au point constante au taux de 1,2 $\mu\text{m/s}$ pour éviter une variation de la quantité de matériel extrait au fur et à mesure que la profondeur du cratère augmente.

2.3.4. SPECTRE POUR ÉTABLIR L'EMPREINTE ÉLÉMENTAIRE

Chez les larves, bien que le temps d'acquisition total varie entre 65 et 140 secondes, seule une portion du spectre d'analyse a été considérée. Ainsi, la portion du spectre conservée a été déterminée en fonction du début du signal du ^{43}Ca et de la ^{29}Si . Considérant l'augmentation subite de la concentration en ^{43}Ca comme le début de l'ablation de l'otolithe, le signal a été considéré comme stable cinq secondes après le début de la

présence de cet isotope à l'intérieur du spectre et pris en compte jusqu'à cinq secondes avant l'augmentation de la concentration en ^{29}Si , nous indiquant que la lame de verre avait été atteinte. Le temps total d'acquisition retenu est d'une durée maximale de 50 secondes. Ce qui fait en sorte que le temps d'ablation considéré pour les analyses varie de 3,40 à 49,99 secondes, mais se situe en moyenne à 27,29 secondes. La portion considérée correspond au cœur de l'otolithe, c'est-à-dire à l'empreinte élémentaire qui représente le lieu de naissance.

En ce qui concerne les juvéniles, même si le temps d'acquisition total était de 140 secondes, seulement une portion du spectre d'analyse a été considérée. Pour chaque otolithe, le signal a été compilé 10 secondes après le début de la détection du ^{43}Ca , pour permettre de brûler les couches superficielles laissées au sablage et atteindre le noyau. Le temps d'ablation total retenu est de 50 secondes, en référence aux plus gros otolithes de larves analysés, mais aussi, afin d'éviter une atténuation du signal propre au noyau par le brûlage des couches adjacentes.

Afin de déterminer quels éléments allaient être retenus parmi les 18 mesurés, nous avons d'abord vérifié la moyenne de concentration ainsi que l'écart-type par zone de production dans le but d'identifier ceux qui présentaient des moyennes supérieures à la limite de détection pour la majorité des zones d'échantillonnages (Figure 4). Dans le cas des isotopes du même élément, nous avons sélectionné celui qui était le plus abondant. À partir de ces critères, 12 éléments et isotopes ont été éliminés tandis que 6 éléments ont été conservés pour les analyses statistiques. Cependant, chez les juvéniles, le ^{11}B n'a pu être

considéré puisque les valeurs mesurées étaient en deçà de la limite de détection (Tableau 3).

Tableau 3. Limites de détection (LD) et coefficient de variation moyens (CV) des éléments conservés pour les analyses de l’empreinte élémentaire a) des larves et b) des juvéniles

	¹¹ B	²⁴ Mg	³⁹ K	⁵⁵ Mn	⁸⁸ Sr	¹³⁷ Ba
a) Larves						
LD (ppm)	2,87	6,84	12,49	2,57	1,88	2,39
CV (%)	31,53	136,33	39,49	56,03	89,68	39,38
b) Juvéniles						
LD (ppm)	n/a	9,88	39,97	2,80	6,37	2,23
CV (%)	n/a	91,01	35,40	29,78	137,17	92,76

2.5. ANALYSES STATISTIQUES

2.5.1. EMPREINTES ÉLÉMENTAIRES DES LARVES

Afin de respecter les conditions d’application de l’analyse de variance (ANOVA), les concentrations de ²⁴Mg, ³⁹K, ⁵⁵Mn, ⁸⁸Sr et ¹³⁷Ba ont subi une transformation logarithmique pour normaliser leur distribution avant d’effectuer les analyses statistiques. La concentration de ¹¹B n’a subi aucune transformation puisque sa distribution était normale. De plus, la distribution des données a été standardisée (centrées et réduites) afin de faciliter leurs comparaisons (Quinn et Keough, 2002).

Pour analyser et caractériser la signature géochimique des otolithes des larves, plusieurs analyses univariées et multivariées ont été utilisées. Tout d’abord, une analyse de variance à un critère de classification (ANOVA), suivie d’un test de comparaison multiple

H.S.D. de Tukey, ont été effectués afin de déterminer si les moyennes de concentrations des éléments différaient significativement ($P < 0,05$) entre les zones d'échantillonnages et ainsi confirmer le choix des éléments à inclure à l'intérieur des analyses multivariées. Une analyse de corrélation a aussi été effectuée afin de déterminer s'il existait un lien de colinéarité entre les concentrations des éléments. Ensuite, l'analyse de variance multivariée (MANOVA) de même que l'analyse discriminante ont été appliquées pour quantifier et illustrer la différenciation de l'empreinte élémentaire entre les sites. La MANOVA et la statistique de la trace de Pillai ont été utilisées afin de déterminer si une différence significative était perceptible entre les signatures géochimiques dans l'espace multidimensionnel, en utilisant seulement les éléments qui sont ressortis comme significativement différents à l'intérieur de l'ANOVA (Quinn et Keough, 2002). La représentation graphique des deux premières variables canoniques, incluant l'ellipse de confiance à 95 % autour des centroïdes de chaque distribution, a permis de visualiser la différence de l'empreinte élémentaire multivariée entre les zones de production de perchaudes (Wilkinson et al., 1996). Une analyse de la fonction linéaire discriminante (AFLD) pas à pas, basée sur les mêmes éléments que la MANOVA, a été utilisée pour déterminer les taux de reclassification par zone de production faite à partir du site où les larves de perchaudes ont été prélevées. Un algorithme de classification utilisant la technique du « jackknife » a été utilisé pour estimer les pourcentages de reclassification. En retirant chaque échantillon de façon séquentielle du tableau de données, le logiciel estime tour à tour la fonction discriminante avec les échantillons restants et utilise la fonction résultante pour reclasser la valeur retirée. La signification statistique a été déterminée par

l'utilisation de la statistique de la trace de Pillai. Le meilleur modèle AFLD pas à pas a été établi à partir du plus grand succès de reclassification.

2.5.2. ORIGINES DES JUVÉNILES

Afin de respecter les conditions d'application de l'analyse de variance (ANOVA), les concentrations de ^{24}Mg , ^{39}K , ^{55}Mn , ^{88}Sr et ^{137}Ba ont subi une transformation logarithmique pour normaliser leur distribution avant d'effectuer les analyses statistiques. De plus, la distribution des données a été standardisée (centrées et réduites) afin de faciliter leurs comparaisons (Quinn et Keough, 2002).

La méthode de l'estimation du maximum de vraisemblance a été utilisée, pour déterminer, premièrement, la capacité de l'empreinte élémentaire à différencier la provenance des larves originaires des différentes zones de production et deuxièmement, la proportion des perchaudes juvéniles survivantes d'origine inconnue provenant de chacune de ces zones. Cette méthode a un pouvoir discriminant maximal pour les situations impliquant la reclassification des individus d'origine inconnue (Millar, 1987; Millar, 1990a). Ces analyses comportent trois étapes principales. La première étape évalue la contribution réelle ou observée par secteur. La deuxième étape consiste à la reclassification des spécimens d'origine connue, soit nos larves. À partir de là, comme l'estimateur a déterminé la façon de redistribuer les individus à l'intérieur de chaque zone de production, il devient possible de franchir la dernière étape qui consiste à reclasser les individus d'origine inconnue, soit nos perchaudes juvéniles survivantes.

Les résultats ont été obtenus à partir d'un programme de simulation d'analyses multi-usages de type « bootstrap » (Millar, 1990b). Le programme a été lancé initialement en mode simulation avec les données de composition élémentaire des larves. L'erreur absolue représente la différence entre la contribution actuelle ou connue des larves et leur contribution moyenne estimée. Cent simulations ont été réalisées à partir des données recueillies chez les larves pour déterminer la variabilité de l'estimateur. La procédure utilisée pour estimer la variabilité est la méthode du ré-échantillonnage et de la reclassification ou « bootstrapping » (Millar, 1990a; Millar, 1990b). Une centaine de simulations ont été réalisées et les données ont été utilisées pour déterminer la variabilité de l'estimateur. La seconde analyse a impliqué l'utilisation de l'empreinte élémentaire des larves comme données de base pour lesquelles l'affinité de chacune des zones de production était connue et de lancer le programme en mode « bootstrap » pour estimer la proportion de juvéniles provenant de chacune des zones de production du lac Saint-Pierre. Ainsi, les juvéniles représentaient nos individus d'origine inconnue. Encore une fois, cent simulations ont permis d'évaluer la variabilité associée à la proportion des perchaudes juvéniles estimées provenir de chaque zone de production ou secteur.

Connaissant les empreintes élémentaires des principales zones de production, nous avons aussi vérifié si les perchaudes juvéniles étaient nées à proximité du lieu où elles ont été pêchées à la fin de leur saison de croissance. Nous avons donc refait les analyses pour les individus de chaque zone de production échantillonnée.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

3.1. EMPREINTES ÉLÉMENTAIRES DES LARVES

La concentration moyenne des éléments variait significativement entre les zones échantillonnées au lac Saint-Pierre (ANOVA, $P < 0,001$; Figure 4) pour l'ensemble des six éléments retenus au départ (B, Mg, K, Mn, Sr et Ba). Lorsque nous observons la concentration de chaque élément par site, nous constatons que les zones de production de Nicolet et de Yamachiche présentent les plus basses concentrations de B. Parmi les écarts les plus marqués, nottons la faible concentration de K dans le secteur de Beaumont, ainsi que la forte concentration de Mg et de Mn dans le site Maskinongé. Nous remarquons un gradient croissant des concentrations de Sr de l'amont vers aval. Enfin, pour le Ba, la plus forte concentration moyenne apparaît à l'Anse du Fort et la plus faible à Beaumont.

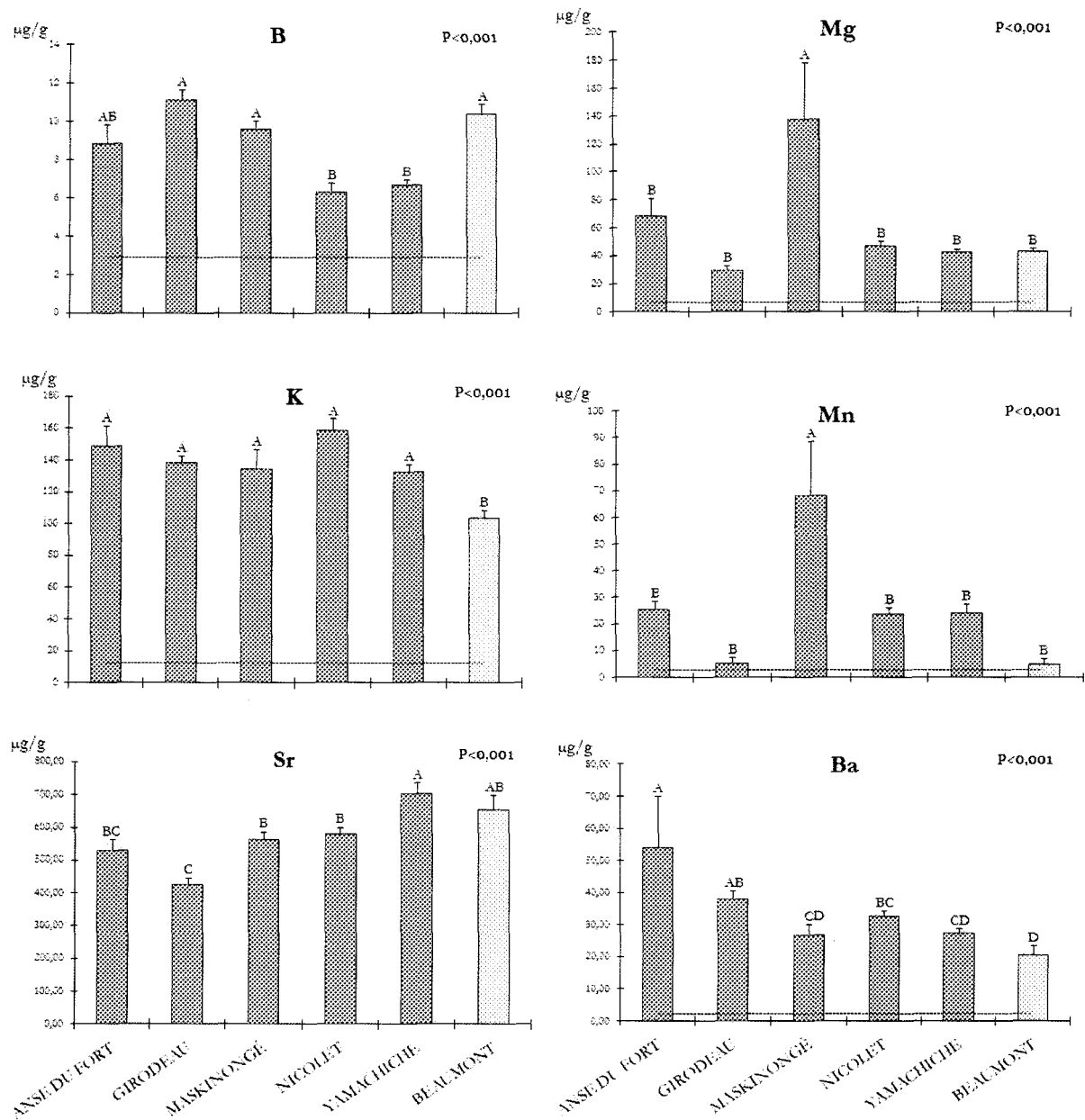


Figure 4. Concentrations moyennes avec erreurs-types des éléments par zone de production pour l’empreinte élémentaire des larves du lac Saint-Pierre, la ligne pointillée indiquant la limite de détection moyenne sauf pour le Sr dont la limite de détection se confond avec l’abscisse (pour chaque élément, les concentrations moyennes présentant une différence significative entre les zones sont indiquées par des lettres distinctes, ANOVA $P < 0,001$)

Avant de poursuivre les analyses statistiques, il a été nécessaire de vérifier si une relation de colinéarité était présente entre les éléments à l'étude. Les analyses multivariées ont démontré qu'une telle relation existait entre le Mg et le Mn. Comme il n'est pas recommandé d'utiliser des variables corrélées (Quinn et Keough, 2002), et que de façon générale le Mg était plus abondant, le Mn a donc été retiré des analyses subséquentes.

D'après les analyses multivariées (MANOVA, statistiques de la trace de Pillai, $P < 0,001$), l'empreinte élémentaire diffère de façon très significative entre les zones de production. Aussi, une comparaison à l'aide d'une MANOVA pour chaque paire de sites a établi que l'empreinte élémentaire différait significativement entre tous les sites (Tableau 4).

Tableau 4. Résultats de la MANOVA par paires de sites, statistiques de la trace de Pillai (correction de Bonferroni, alpha <0,0033)

Anse du Fort					
Beaumont	$P < 0,001$	Beaumont			
Girodeau	$P < 0,001$	$P < 0,001$	Girodeau		
Maskinongé	$P = 0,0023$	$P < 0,001$	$P < 0,001$	Maskinongé	
Nicolet	$P = 0,0014$	$P < 0,001$	$P < 0,001$	$P < 0,001$	Nicolet
Yamachiche	$P < 0,001$	$P < 0,001$	$P < 0,001$	$P < 0,001$	$P < 0,001$

De plus, la concentration des cinq éléments qui s'était révélée distincte entre les sites de capture (ANOVA) contribue de façon significative à la fonction discriminante (AFLD, Lambda de Wilk, $P < 0,001$).

Les trois premiers axes canoniques (AC) pour ce modèle expliquent plus de 99 % la dispersion totale de l'ensemble des données (AC1 = 61,4 %; AC2 = 34,6 %; AC3 = 3,8 %). Les plus fortes corrélations entre les éléments traces et les fonctions canoniques sont entre Sr, Ba et AC1; entre B, K et AC2; puis entre Mg et AC3.

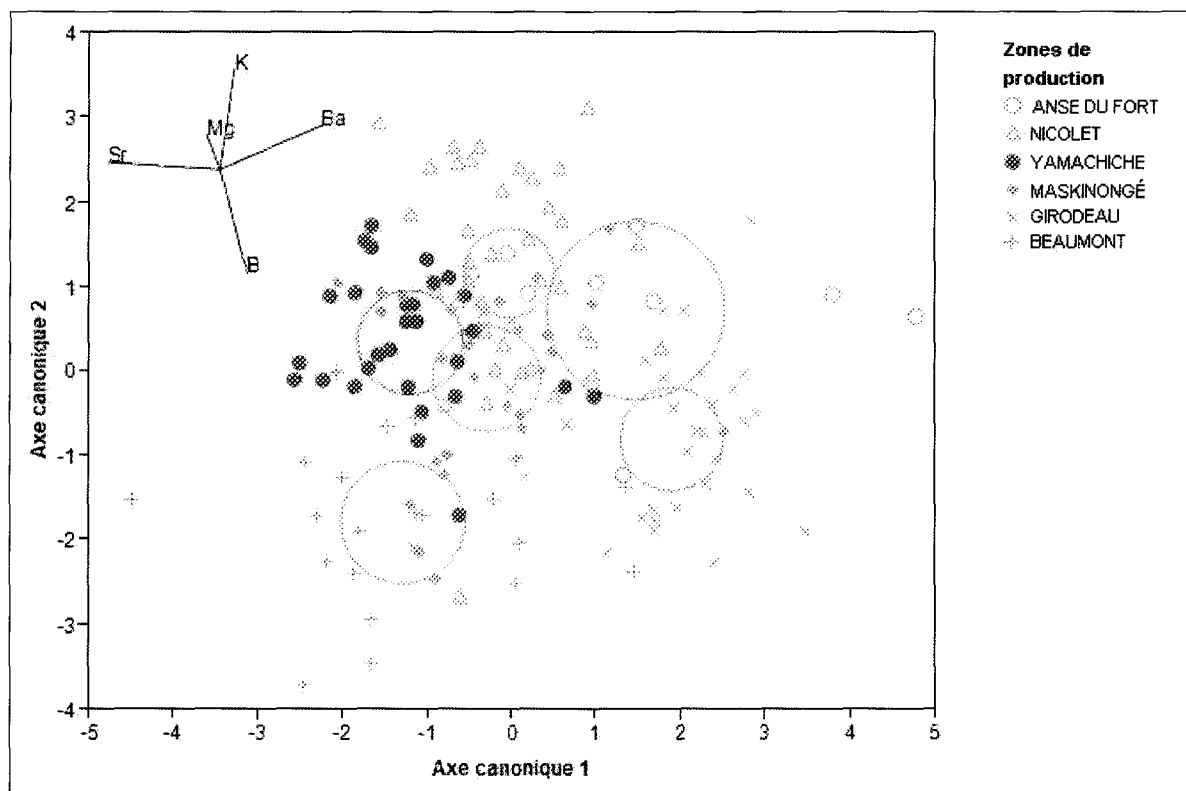


Figure 5. Représentation graphique des deux premières variables canoniques basées sur l'analyse de la fonction linéaire discriminante pour un modèle bâti à partir de cinq éléments, soit B, Mg, K, Sr et Ba pour l'empreinte élémentaire des larves. Les symboles vides représentent les stations de la rive sud et les symboles pleins, les stations de la rive nord. (ellipse des bornes d'intervalles de confiance des moyennes à 95 %)

La représentation graphique des deux premiers axes canoniques (Figure 5), incluant l'ellipse des bornes d'intervalles de confiance des moyennes à 95 % souligne que les sites échantillonnés diffèrent significativement entre eux ($P < 0,05$), et ce, malgré des

chevauchements entre Maskinongé et Yamachiche, ainsi que Girodeau et Anse du Fort. Par ailleurs, la station de Beaumont située en aval se détache par rapport aux autres zones de production du lac Saint-Pierre. Un autre aspect qui retient l'attention est la discrimination entre les zones de production situées le long de la rive nord et de la rive sud du lac Saint-Pierre.

Tableau 5. Précision de la classification d'après la technique du « Jacknife », du nombre d'échantillons de perchaudes identifiées à son site de capture réel basé sur l'analyse de la fonction linéaire discriminante de l'empreinte élémentaire du cœur de l'otolithe des larves avec cinq éléments explicatifs (B, Mg, K, Sr et Ba)

Zone de capture réelle	Prévisions selon AFLD						Total	% correct
	Anse du Fort	Beaumont	Girodeau	Maskinongé	Nicolet	Yamachiche		
Anse du Fort	6	0	1	1	2	0	10	60,00
Beaumont	0	16	2	0	0	3	21	76,19
Girodeau	5	2	22	0	0	1	30	73,33
Maskinongé	2	5	1	15	4	1	28	53,57
Nicolet	2	1	2	2	30	3	40	75,00
Yamachiche	0	2	2	1	4	20	29	68,97
% correct du modèle								68,99

Le Tableau 5 présente la précision de la reclassification d'après la technique du « Jacknife » du nombre de perchaudes reclassées à l'intérieur de son site de capture réel basée sur l'AFLD en utilisant cinq éléments, soit B, Mg, K, Sr et Ba. Le succès de cette reclassification est de 69 % pour l'ensemble du modèle. Les meilleures concordances entre

les observations et les valeurs prédites ont été enregistrées dans les secteurs de Beaumont (76 %), Nicolet (75 %) et Girodeau (73 %), alors que la plus faible concordance a été obtenue pour la zone de Maskinongé (54 %).

Tableau 6. L'effet de la régression pas-à-pas des variables sur la concordance de la reclassification des larves de perchaudes basée sur l'empreinte élémentaire de l'otolithe utilisée dans l'analyse de la fonction linéaire discriminante (AFLD)

Zones de production	Prévisions correctes par l'AFLD (%)			
	cinq éléments (B, Mg, K, Sr, Ba)	quatre éléments (B, Mg, Sr, Ba)	trois éléments (Mg, Sr, Ba)	deux éléments (Sr, Ba)
Anse du Fort	60,00	60,00	60,00	60,00
Beaumont	76,19	71,43	42,86	42,86
Girodeau	73,33	73,33	80,00	76,67
Maskinongé	53,57	35,71	39,29	25,00
Nicolet	75,00	65,00	50,00	25,00
Yamachiche	68,97	72,41	58,62	62,07
Total (%)	68,99	63,29	55,06	46,20

Le Tableau 6 présente l'effet de la régression pas-à-pas des variables sur l'exactitude de la reclassification des larves de perchaudes basée sur l'empreinte élémentaire de l'otolithe utilisée dans l'AFLD. Ainsi, à partir du modèle complet comportant cinq éléments, une régression pas-à-pas par le retrait séquentiel de la variable la moins explicative (basée sur le test de Fisher) a été tentée afin de voir l'effet sur l'exactitude des prévisions. Lorsque moins de quatre éléments ont été inclus à l'intérieur du modèle, le pourcentage correct de reclassification diminue sous la barre des 60 %. Le

modèle à deux variables incluant seulement le Sr et le Ba obtient tout de même un taux d'exactitude de plus de 46 %.

3.2. CONNECTIVITÉ ENTRE LES JUVÉNILES ET LES LARVES

Tableau 7. Résultats de l'estimation du maximum de vraisemblance pour a) les larves et b) les juvéniles d'origine inconnue de perchaudes du lac Saint-Pierre

Zone de production	Fréquence observée (%)	Fréquence estimée (%)	Erreur-type (%)
a) Larves			
Anse du Fort	6,3	2,1	2,8
Beaumont	13,3	12,3	6,3
Girodeau	19,0	21,2	6,3
Maskinongé	17,7	8,9	4,1
Nicolet	25,3	33,8	10,1
Yamachiche	18,4	21,9	11,3
b) Juvéniles			
Anse du Fort		3,4	5,2
Beaumont		9,9	6,6
Girodeau		22,2	8,7
Maskinongé		10,5	4,6
Nicolet		24,7	13,6
Yamachiche		29,5	10,5

La méthode de l'estimation du maximum de vraisemblance a été utilisée afin de déterminer la capacité de l'empreinte élémentaire à établir la proportion de larves issues des différentes zones de production. La contribution réelle varie entre 6,3 et 25,3 % en fonction de la zone de production (Tableau 7). La contribution estimée selon les différentes zones varie entre 2,1 et 33,8 %, suggérant un pourcentage d'erreur de 1,0 à 8,9 %, même si ce

pourcentage d'erreur n'inclut pas la variabilité à l'intérieur des simulations. Les plus fortes erreurs ont été associées aux zones de production de Maskinongé (8,9 %) et Nicolet (8,5 %) alors que pour les autres secteurs elle est de moins de 4,2 %. L'erreur-type calculée pour l'estimation des larves de perchaudes provenant de chaque zone de production varie entre 2,8 et 11,3 %, et les plus grandes valeurs sont pour les zones de Yamachiche et de Nicolet.

La méthode de l'estimation du maximum de vraisemblance a aussi été utilisée afin de déterminer la proportion des juvéniles originaires des différentes zones de production du lac Saint-Pierre. La majorité des perchaudes capturées à l'intérieur du lac Saint-Pierre (76,3 %) proviendraient de trois zones de production, soit Yamachiche, Nicolet et Girodeau. (Tableau 7). Environ 10 % des perchaudes seraient originaires de Maskinongé et Beaumont alors que 3 % seraient issues de l'Anse du Fort. Ces estimations de la proportion de perchaudes juvéniles qui proviennent des différentes zones de production ne prennent pas en considération la variabilité découlant de l'estimateur du maximum de vraisemblance. L'analyse des données après cent simulations démontre que cette variabilité se situe entre 4,6 % (Maskinongé) et 13,6 % (Nicolet).

Tableau 8. Contributions estimées (erreur-type) en pourcentage par zone de production à l'aide de la méthode du maximum de vraisemblance pour les juvéniles de perchaudes du lac Saint-Pierre

Zone de production	Origine des juvéniles				
	Anse du Fort	Girodeau	Maskinongé	Nicolet	Yamachiche
Anse du Fort	6,76 (11,97)	12,13 (14,08)	0,04 (00,32)	0,00 (0,00)	0,00 (0,00)
Beaumont	11,82 (13,11)	0,00 (0,00)	10,63 (9,54)	9,73 (11,83)	9,10 (10,94)
Girodeau	17,57 (18,80)	15,19 (12,70)	49,26 (18,62)	25,65 (16,84)	0,00 (0,00)
Maskinongé	0,00 (0,00)	69,42 (14,16)	0,00 (0,00)	0,00 (0,00)	0,00 (0,00)
Nicolet	63,85 (22,19)	2,88 (6,94)	29,51 (21,67)	55,27 (24,96)	0,00 (0,00)
Yamachiche	0,00 (0,03)	0,37 (1,91)	10,55 (13,43)	9,36 (18,36)	90,90 (10,94)

Enfin, la méthode de l'estimation du maximum de vraisemblance a aussi été utilisée afin de déterminer la proportion des juvéniles demeurés à l'intérieur de leur zone de production d'origine au cours de la saison de croissance. Selon les résultats obtenus, seules les perchaudes survivantes des secteurs de Yamachiche et de Nicolet seraient majoritairement originaires de ces secteurs avec des proportions de 91 % et 55 % respectivement (Tableau 8). Par ailleurs, nous constatons que les juvéniles de l'Anse du Fort seraient issues à 64 % de Nicolet et que seule une faible contribution locale serait attribuable à la production de ce secteur. Enfin, la majorité des individus pêchés dans les secteurs de Maskinongé et de Girodeau auraient vu le jour à l'intérieur de l'autre zone de production, démontrant des échanges entre ces deux sites.

CHAPITRE 4

DISCUSSION

Les études portant sur les éléments traces dans les otolithes de poissons d'eau douce sont rares. Sachant qu'il existe des contrastes physicochimiques entre les masses d'eau du Saint-Laurent, et que cette variabilité pouvait s'appliquer à l'échelle du lac Saint-Pierre, nous avons donc établi les signatures caractéristiques de cinq zones de production de larves de perchaude connues et aussi retracé la provenance des juvéniles en fin de saison de croissance.

Nos résultats indiquent que l'empreinte élémentaire du cœur de l'otolithe des jeunes perchaudes du lac Saint-Pierre est significativement différente entre les cinq principaux habitats de reproduction du plan d'eau. Il est possible de distinguer le lieu d'éclosion des jeunes perchaudes avec une précision moyenne de 69 % sur la base d'un modèle incorporant cinq éléments mesurés dans l'otolithe (B, Mg, K, Sr et Ba). Le pouvoir discriminant est comparable à celui d'autres études décrivant la différence de l'empreinte élémentaire entre les habitats (Brazner et al., 2004a; Campana et al., 1995; Gillanders et Kingsford, 2000). De plus, la méthode du maximum de vraisemblance nous a permis d'établir la contribution estimée à partir de la contribution réelle. Cette dernière variait entre 2,1 et 33,8 %, ce qui est comparable aux résultats obtenus à l'aide des AFLD décrites précédemment, et reflète la réalité compte-tenu de la variabilité attribuable à la méthode.

De plus, les résultats indiquent que l'empreinte élémentaire diffère de façon significative entre toutes les zones de production. La représentation graphique des deux premiers axes canoniques permet d'ailleurs de visualiser la discrimination de l'empreinte élémentaire de l'otolithe entre les sites. Il faut souligner que la station de Beaumont, située

dans le fleuve Saint-Laurent en aval du lac Saint-Pierre, se détache nettement des autres zones de production. Comme ces perchaudes font partie du même réseau hydrographique et que selon Leclerc et al. (2007; 2008), elles appartiennent au même groupe génétique que les perchaudes du lac Saint-Pierre, il apparaît que la méthode de l’empreinte élémentaire des otolithes permet d’obtenir une résolution encore plus fine de la structure des stocks de perchaude dans le Saint-Laurent qu’avec la génétique à l’échelle du paysage. Cette information est primordiale pour comprendre la dynamique du recrutement dans le Saint-Laurent et, plus spécifiquement, dans le lac Saint-Pierre.

Les variables canoniques indiquent de légers chevauchements entre les ellipses de confiances, particulièrement entre Maskinongé et Yamachiche. Comme les contrastes entre les signatures semblent marqués entre la rive nord et la rive sud du lac Saint-Pierre, nous avons testé un modèle en fonction de la situation géographique. En effet, un modèle d’AFLD a été analysé pour vérifier s’il était plus facile de distinguer l’empreinte élémentaire des zones de production en fonction de la situation géographique par rapport au lac Saint-Pierre, c’est-à-dire rive nord (Maskinongé et Yamachiche), rive sud (Anse du Fort et Nicolet), ouest (Girodeau) et est (Beaumont). Ce modèle permet la reclassification de plus de 73 % des perchaudes avec un succès comparable à notre modèle initial. Par contre, même si dans ce cas il n’est pas très avantageux d’effectuer certains regroupements, il peut parfois être plus efficace de regrouper des secteurs pour augmenter le score des analyses. Par exemple, une étude de Gillanders (2002b) présente une distinction basée sur un regroupement de plusieurs estuaires, puisque ces derniers étaient trop nombreux à distinguer par rapport au nombre de variables discriminatoires retenues.

Il faut admettre qu'il existe une possibilité que l'empreinte obtenue chez les larves puisse être en partie le résultat de l'influence d'une transmission de la part de la mère à ses embryons. En effet, selon Elsdon et al (2008), la microchimie de l'ovocyte refléterait celle de la mère, du moins jusqu'à la fécondation, lorsque le chorion deviendrait imperméable au passage des ions dissouts. La microchimie de la mère pourrait donc laisser une trace à l'intérieur de l'otolithe chez l'embryon. Cependant, en raison de la taille (40 μm) du faisceau laser utilisé lors des analyses, comparativement au diamètre du cœur de l'otolithe chez la perchaude qui mesure en moyenne 20 μm , nous croyons que l'influence de la mère, serait minime par rapport à la quantité de matériel analysé. De plus, si une marque transmise de la mère avait eu une influence, une variation plus grande aurait été observée, de sorte qu'aucun patron n'aurait été identifié. Cependant, comme nous avons obtenu un patron, il est raisonnable de penser que les empreintes élémentaires distinctes soient le résultat des signaux environnementaux plutôt que d'une transmission maternelle.

Comme les concentrations élémentaires moyennes obtenues chez les larves sont significativement différentes entre les zones de capture, et ce, pour l'ensemble des éléments retenus, nous pouvons confirmer que l'empreinte élémentaire de l'otolithe chez les larves de perchaudes du lac Saint-Pierre représente un marqueur spécifique qui permet de distinguer la provenance des spécimens. Nous croyons que l'application de cet outil en plein essor sera utile au niveau de l'écologie larvaire en fournissant un portrait précis de la répartition spatio-temporelle des spécimens. Ainsi, les empreintes élémentaires obtenues sont suffisamment contrastées pour différencier les sites entre eux, pour caractériser différents stocks de perchaude et améliorer la compréhension de la structure de la

population de perchaude du lac Saint-Pierre, ce qui permettra éventuellement une meilleure connaissance des processus de recrutement de la perchaude dans le Saint-Laurent. Notre étude appuie donc celles de Brazner et al. (2004a; 2004b) et de Fisher et al. (1999), qui validaient l'application de cette technique sur les poissons d'eaux douces.

L'empreinte élémentaire de l'otolithe chez le poisson permet aussi d'établir des liens de connectivité, par exemple entre la présence de juvéniles en fin de saison et les zones de production des larves (site de reproduction). En identifiant le lieu de naissance des juvéniles du lac Saint-Pierre, il devient alors possible de déterminer les zones de production présentant les meilleurs succès de survie et donc susceptibles de contribuer le plus au recrutement. À partir de l'empreinte élémentaire déterminée chez les larves, l'estimateur du maximum de vraisemblance permet la reclassification des juvéniles à l'intérieur de leur zone de production d'origine. Selon nos résultats, l'ensemble des cinq zones étudiées contribue de façon proportionnelle à sa production de départ indiquée par la contribution des larves. Il ne semble donc pas avoir sélection des survivants en provenance d'un site spécifique. Les perchaudes capturées au lac Saint-Pierre (76,3 %) en 2007 proviendraient principalement de trois zones de production, soit Yamachiche, Nicolet et Girodeau dont la productivité était supérieure au cours de cette année. Cependant, nous ignorons si la cause de cette production accrue est reliée à des conditions environnementales particulières qui règnent à l'intérieur de ces secteurs, à une plus grande abondance de proies ou encore d'une pression moins importante de la part des prédateurs favorisant ainsi la survie des perchaudes. Une étude ultérieure pourrait se pencher sur cette question afin de déterminer les facteurs favorisant la reproduction et la survie à l'intérieur de ces zones.

Un intérêt majeur de l’empreinte élémentaire des otolithes réside dans le fait qu’elle permet de retracer le lieu de naissance des poissons juvéniles. Nous avons donc comparé les sites où chaque juvénile a été pêché en fin de saison avec leurs lieux de naissance pour vérifier si les jeunes perchaudes avaient effectué des déplacements ou des mouvements de migration au cours de cette période. Une correspondance parfaite entre les deux lieux indiquait un déplacement nul de la jeune perchaude. Dans le cas contraire, une différence entre les deux signatures reflétait un déplacement net entre le lieu de naissance au début et le lieu de capture à la fin de la saison de croissance. Selon les résultats obtenus, seules les perchaudes survivantes pêchées dans les secteurs de Yamachiche et de Nicolet seraient majoritairement issues de ces secteurs. Ceci suggère qu’une proportion importante de leurs larves n’amorcerait aucune migration. Nous constatons aussi que les juvéniles de l’Anse du Fort seraient principalement issues de Nicolet et qu’il n’y aurait qu’une très faible contribution locale. Il est possible que ce résultat soit expliqué en partie par la petite taille de l’échantillon analysé pour cette zone, ou encore que l’année 2007 ait été atypique. En effet, si on se fie aux échantillonnages annuels du MRNF, ce secteur est habituellement très productif. Enfin, nos résultats indiquent des échanges importants en automne entre les secteurs Maskinongé et Girodeau. Si ces résultats sont dus à des migrations, ils sont sans doute attribuables à la proximité de ces deux zones de production. Cependant, Anse du Fort et Maskinongé ont présenté les plus faibles succès de reclassification. C’est également à ces sites que les larves analysées avaient les tailles les plus élevées (Tableau 1). Bien qu’il est reconnu que du transport passif puisse avoir lieu au stade vitellin, il semble qu’il y ait pu avoir une certaine « contamination » de ces sites par l’apport d’individus issus d’ailleurs.

Puisque le lac Saint-Pierre présenterait des conditions physicochimiques différentes, se reflétant par des signatures différentielles chez les larves, l'ensemble de nos résultats suggère que les larves puissent effectuer, au cours de la saison de croissance, des mouvements entre les diverses zones de production, laissant penser que les perchaudes du lac Saint-Pierre n'appartiendraient qu'à un seul et unique stock. Les mouvements à l'intérieur du lac Saint-Pierre contribueraient donc à maintenir un flux génique homogène. Ce qui supporterait les résultats de Leclerc et al. (2007; 2008), selon lesquels les perchaudes évoluant entre le lac Saint-Pierre et la ville de Québec ne formeraient qu'un seul stock génétique.

Parmi les divers éléments trace analysés, le Ba et le Sr étaient ceux qui présentaient les contrastes les plus marqués entre les sites. La contribution de ces deux éléments représentait 46 % de la fonction discriminante dans le modèle le plus performant, qui comportait cinq éléments (B, Mg, K, Sr et Ba). Leur contribution a été chiffrée en utilisant une régression pas-à-pas par retrait séquentiel de la variable la moins explicative (test de Fisher). Cet exercice a montré qu'avec moins de quatre éléments inclus dans le modèle, le pourcentage correct de reclassification diminue fortement. Parmi les études publiées concernant l'empreinte élémentaire, le Ba et le Sr font généralement partie des variables explicatives les plus importantes (Brazner et al., 2004a; Brazner et al., 2004b; Campana et al., 2000; Thorrold et Shuttleworth, 2000). De plus, leur concentration relative à l'intérieur de l'otolithe semblerait, selon Bath et al. (2000), refléter la concentration présente dans l'environnement. Il est reconnu que le Sr est positivement corrélé alors que le Ba est négativement corrélé à la salinité de l'eau (Elsdon et al., 2008). L'échantillon de Beaumont,

influencé par la salinité de l'estuaire, présente donc des résultats conformes à ce que nous attendions. Comme l'objet de la présente étude ne consistait pas à élucider les mécanismes d'intégration des éléments traces, mais bien à établir la validité de l'empreinte élémentaire pour distinguer les spécimens issus des différentes zones de production du lac Saint-Pierre, nous n'avons pas analysé les caractéristiques physiques et chimiques des eaux du lac Saint-Pierre ou du secteur de Beaumont. Nous ne pouvons donc établir avec certitude que la composition élémentaire de l'otolithe obtenue traduit fidèlement les caractéristiques physiques et chimiques du milieu ambiant. Un rapport publié par le Centre Saint-Laurent (1996), indique des différences importantes dans la physico-chimie de l'eau entre les trois principales masses d'eau du lac Saint-Pierre, et aussi avec celle du secteur de Beaumont. Nous suggérons qu'une analyse physico-chimique des différentes masses d'eau du Saint-Laurent soit réalisée dans le futur pour établir l'origine des différentes concentrations en éléments traces retrouvées à l'intérieur des otolithes.

Parmi les 18 éléments mesurés à l'aide de l'ICPMS lors de notre analyse exploratoire, seuls cinq éléments ont été conservés pour établir un modèle retraçant l'empreinte élémentaire, tant chez les larves que chez les juvéniles. Les 13 autres éléments traces montraient des concentrations tellement faibles qu'elles étaient inférieures à la limite de détection ou encore absente du signal. Il faut souligner que des éléments tels que le Na, Al, Fe, Cu, Zn, Hg et Pb, dont certains ont été significatifs à l'intérieur d'autres études (Clarke et al., 2009; Fairclough et al., 2011; Friedrich et Halden, 2011), ne sont pas ressortis de façon significative dans nos travaux de recherche. De plus, plusieurs isotopes du même élément ont parfois été sélectionnés. Ceci nous amène à penser qu'il serait

possible de mettre l'accent sur un plus petit nombre d'analytes pour des travaux ultérieurs au lac Saint-Pierre, ce qui augmenterait l'efficacité des analyses. En effet, la précision des comptes effectués par l'ICPMS augmente lorsque le nombre d'éléments à analyser est moindre, car le temps d'analyse demeure constant. Il s'agit donc de choisir judicieusement les éléments retenus pour les analyses afin de conserver seulement ceux qui offrent le plus grand pouvoir discriminant.

Avec les otolithes, l'échelle sur laquelle nous travaillons fait en sorte que de nombreuses sources d'erreurs sont possibles. C'est pourquoi le choix du mode de conservation et des manipulations a été effectué dans le but de minimiser les risques de contamination. Lors de l'ablation, il a aussi été très important de s'assurer de bien viser la zone voulue avec le laser afin d'obtenir une analyse comparable entre les otolithes échantillonnés.

Les résultats de la présente étude sont prometteurs en ce sens qu'ils ouvrent la voie à une meilleure compréhension de l'écologie larvaire chez les poissons d'eau douce. L'identification des signatures élémentaires chez les jeunes poissons donne la possibilité de déterminer les lieux de naissance, d'identifier les sources et les puits de production de larves et aussi de vérifier si les jeunes recrues ont effectué des déplacements au cours de la saison de croissance. Comme la signature géochimique varie au cours du temps (Gillanders (2002a), nous pensons qu'il faudrait répéter le même type d'analyse sur plusieurs années consécutives afin d'établir la variabilité interannuelles des signatures élémentaires au sein de chaque zone de production du lac Saint-Pierre. Il serait aussi possible d'identifier le lieu

de naissance des poissons adultes pour obtenir un portrait précis du succès de recrutement en fonction de la zone de production et de confirmer si les patrons spatiaux se répètent dans le temps. L’empreinte élémentaire permettant ainsi de confirmer les zones de production contribuant le plus au recrutement, il deviendrait alors possible de mieux les protéger afin de favoriser la survie de ce stock de perchaude. Aussi, il serait important d’avoir une meilleure connaissance de la dynamique du recrutement de la perchaude. Comme les jeunes stades sont très sensibles aux conditions environnementales, il serait crucial de déterminer les facteurs qui favorisent leur survie. Selon certaines études, le recrutement de la perchaude à l’intérieur des systèmes lacustres serait influencé par la prédation (Hartman et Margraf, 1993; Nielsen, 1980; Rudstam et al., 1996) de même que par certains facteurs biotiques tels que la disponibilité des proies (Graeb et al., 2004) et abiotiques dont la température de l’eau (Glémet et Rodriguez, 2007) et les courants (Dettmers et al., 2005). Ceci permettrait d’établir des mesures de contrôle mieux adaptées et plus efficaces pour aider au rétablissement de cette fragile population du Saint-Laurent.

CHAPITRE 5

CONCLUSION

Nous avons appliqué avec succès au lac Saint-Pierre l'analyse de l'empreinte élémentaire de l'otolithe chez un poisson d'eau douce, une technique qui avait été utilisée à grande échelle spatiale et presque exclusivement en milieu estuarien et marin.

Considérant le cœur de l'otolithe de perchaudes comme un indicateur de l'origine du spécimen, nous l'avons analysé au stade larvaire et juvénile. L'analyse des éléments traces a permis d'identifier la signature élémentaire des cinq zones de production connues du lac Saint-Pierre et d'une station située en aval dans le secteur de Beaumont. Les analyses statistiques ont indiqué que l'empreinte élémentaire différait significativement entre toutes les zones de production. Ces résultats sont comparables à plusieurs études publiées jusqu'à présent, et ce, malgré le fait que nos travaux de recherche se soient déroulés à une échelle spatiale plus réduite.

Afin de déterminer les zones de production susceptibles de contribuer davantage au recrutement, nous avons aussi comparé les signatures élémentaires des larves avec celles obtenues chez les juvéniles capturés en fin de saison. Ceci nous a permis d'établir que chaque zone étudiée représente une source de perchaudes et contribue proportionnellement à sa production de départ indiquée par la contribution des larves, du moins en 2007. Il ne semble donc pas y avoir sélection des survivants en provenance d'un site spécifique. Par contre, nous avons constaté que des échanges entre les zones de production du lac Saint-Pierre se produisaient en cours de saison.

Nos résultats démontrent donc la pertinence de cet outil pour un grand fleuve tel que le Saint-Laurent et suggèrent que cette technique soit très efficace pour déterminer les secteurs sources de production de larves. Nous suggérons de répéter ce type d'analyse sur plusieurs années consécutives afin d'établir une base de référence utile pour déterminer la provenance des individus capturés. Évidemment, une meilleure connaissance de la dynamique de la population de perchaudes du lac Saint-Pierre est primordiale pour contribuer à son rétablissement. Une meilleure connaissance des facteurs environnementaux favorisant la survie et des mesures de protection visant les plus grandes sources de production de perchaudes contribueront au rétablissement du stock de perchaudes du lac Saint-Pierre.

BIBLIOGRAPHIE

- Arai, T. et Hirata, T., 2006. Differences in the trace element deposition in otoliths between marine- and freshwater-resident Japanese eels, *Anguilla japonica*, as determined by laser ablation ICPMS. *Environmental Biology of Fishes*, 75: 173-182.
- Arai, T., Madoka, O. et Takafumi, H., 2007. Trace metal deposition in teleost fish otolith as an environmental indicator. *Water Air Soil Pollution*, 179: 255-263.
- Arslan, Z., 2005. Analysis of fish otoliths by electrothermal vaporization inductively coupled plasma mass spectrometry: aspects of precipitating otolith calcium with hydrofluoric acid for trace element determination. *Talanta*, 65: 1326-1334.
- Bath, G.E., Thorrold, S.R., Jones, C.M., Campana, S.E., McLaren, J.W. et Lam, J.W.H., 2000. Strontium and barium uptake in aragonite otoliths of marine fish. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(10): 1705-1714.
- Bernatchez, L. et Giroux, M., 1996. Guide des poissons d'eau douce du Québec. Éditions Broquet inc: Perchaude : 274-276.
- Billette, A., Chavez, M., Hébert, D., Legendre, F., Poulin, J.-M. et Sow, R.S., 2010. Les pêches et l'aquaculture commerciales: Bilan 2008 et perspectives. ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, Québec, pp. 41.
- Bradbury, I.R., DiBacco, C., Thorrold, S.R., Snelgrove, P.V.R. et Campana, S.E., 2011. Resolving natal tags using otolith geochemistry in an estuarine fish, rainbow smelt *Osmerus mordax*. *Marine Ecology Progress Series*, 433: 195-204.
- Brazner, J.C., Campana, S.E. et Tanner, D.K., 2004a. Habitat fingerprints for lake Superior coastal wetlands derived from elemental analysis of yellow perch otoliths. *Transactions of the American Fisheries Society*, 133: 692-704.
- Brazner, J.C., Campana, S.E., Tanner, D.K. et Schram, S.T., 2004b. Reconstructing habitat use and wetland nursery origin of yellow perch from lake Superior using otolith elemental analysis. *Journal of Great Lakes Research*, 30(4): 492-507.

- Brophy, D., Jeffries, T.E. et Danilowicz, B.S., 2004. Elevated manganese concentrations at the cores of clupeid otoliths: possible environmental, physiological or structural origins. *Marine Biology*, 144: 779-786.
- Brown, J.A., 2006. Classification of juvenile flatfishes to estuarine and coastal habitats based on the elemental composition of otoliths. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 66: 594-611.
- Cadrin, S.X., Friedland, K.D. et Waldman, J.R. (Editors), 2005. Stock identification methods applications in fishery science. Elsevier Academic Press, Burlington, 719 pp.
- Campana, S.E. et Neilson, J.D., 1985. Microstructure of fish otoliths. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 42: 1014-1032.
- Campana, S.E., Gagne, J.A. et McLaren, J.W., 1995. Elemental fingerprinting of fish otoliths using ID-ICPMS. *Marine Ecology Progress Series*, 112: 115-120.
- Campana, S.E., 1999. Chemistry and composition of fish otoliths: pathways, mechanisms and applications. *Marine Ecology Progress Series*, 188: 263-297.
- Campana, S.E., Chouinard, G.A., Hanson, J.M., Frechet, A. et Bratney, J., 2000. Otolith elemental fingerprints as biological tracers of fish stocks. *Fisheries Research*, 46(1-3): 343-357.
- Campana, S.E., Valentin, A., Sévigny, J.-M. et Power, D., 2007. Tracking seasonal migrations of redfish (*Sebastes spp.*) in and around the Gulf of St. Lawrence using otolith elemental fingerprints. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 64: 6-18.
- Carignan, R. et Lorrain, S., 2000. Sediment dynamics in the fluvial lakes of the St. Lawrence river: Accumulation rates and characterization of the mixed sediment layer. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 57(supp.1): 63-77.
- Centre Saint-Laurent, 1996. Rapport-synthèse sur l'état du Saint-Laurent. Volume 1 : L'écosystème du Saint-Laurent. Environnement Canada - Région du Québec, Conservation de l'environnement- et Éditions MultiMondes, Montréal, pp. Coll. "BILAN Saint-Laurent".
- Chambers, R.C. et Trippel, E.A. (Editors), 1997. Early Life History and Recruitment in Fish Populations. *Fish and Fisheries Series*, 21. Chapman and Hall, 595 pp.

- Clapp, D.F. et Dettmers, J.M., 2004. Yellow perch research and management in lake Michigan: evaluating progress in a cooperative effort, 1997-2001. *Fisheries*, 29(11): 11-19.
- Clarke, L.M., Walther, B.D., Munch, S.B., Thorrold, S.R. et Conover, D.O., 2009. Chemical signatures in the otoliths of a coastal marine fish, *Menidia menidia*, from the northeastern United States: spatial and temporal differences. *Marine Ecology Progress Series*, 384: 261-271.
- Cook, G.S., 2011. Changes in otolith microchemistry over a protracted spawning season influence assignment of natal origin. *Marine Ecology Progress Series*, 423: 197-209.
- Côté, J.-P. et Morin, J., 2007a. Principales interventions humaines survenues dans le fleuve Saint-Laurent entre Montréal et Québec au 20^e siècle : 1907-2005. Rapport technique SMC Québec - Section Hydrologie RT-141, Environnement Canada, Sainte-Foy, pp. 65 pages.
- Côté, J.-P. et Morin, J., 2007b. Principales interventions humaines survenues dans le fleuve Saint-Laurent entre Montréal et Québec au 19^e siècle : 1844-1907. Rapport technique SMC Québec - Section Hydrologie RT-140, Environnement Canada, Sainte-Foy, pp. 112 pages + annexes.
- Cuerrier, J.-P., Fry, F.E.J. et Préfontaine, G., 1946. Liste préliminaire des poissons de la région de Montréal et du lac Saint-Pierre. *Le Naturaliste canadien*, 73(17-32).
- Cuerrier, J.-P., 1962. Inventaire biologique des poissons et des pêcheries de la région du lac Saint-Pierre. *Le Naturaliste canadien*, 89: 193-214.
- Cushing, D.H., 1990. Plankton production and year-class strength in fish populations : an update of the match/mismatch hypothesis. *Advances in Marine Biology*, 26: 249-293.
- Dettmers, J.M., Janssen, J., Pientka, B., Fulford, R.S. et Jude, D.J., 2005. Evidence across multiple scales for offshore transport of yellow perch (*Perca flavescens*) larvae in Lake Michigan. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 62: 2683-2693.
- Edmonds, J.S., Caputi, N. et Morita, M., 1991. Stock discrimination by trace-element analysis of otoliths of orange roughy (*Hoplostethus atlanticus*), a deep-water marine teleost. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research*, 42: 383-389.

- Elsdon, T.S. et Gillanders, B.M., 2003. Relationship between water and otolith elemental concentrations in juvenile black bream *Acanthopagrus butcheri*. *Marine Ecology Progress Series*, 260: 263-272.
- Elsdon, T.S., Wells, B.K., Campana, S.E., Gillanders, B.M., Jones, C.M., Limburg, K.E., Secor, D.H., Thorrold, S.R. et Walther, B.D., 2008. Otolith chemistry to describe movements and life-history parameters of fishes: hypotheses, assumptions, limitations and inferences. *Oceanography and Marine Biology*, 46: 297-330.
- Environnement Canada, 2010a. Les lac fluviaux du Saint-Laurent. Environnement Canada, pp. <http://www.ec.gc.ca/stl/default.asp?lang=Fr&n=09C5A944-1>.
- Environnement Canada, 2010b. Suivi de la qualité de l'eau du Saint-Laurent, pp. <http://www.ec.gc.ca/stl/default.asp?lang=Fr&n=ECB00D30-1>.
- Environnement Canada, 2011. Les masses d'eau du Saint-Laurent. Environnement Canada, pp. <http://www.ec.gc.ca/stl/default.asp?lang=Fr&n=3776F8EF-1>.
- Fairclough, D.V., Edmonds, J.S., Lenanton, R.C.J., Jackson, G., Keay, I.S., Crisafulli, B.M. et Newman, S.J., 2011. Rapid and cost-effective assessment of connectivity among assemblages of *Choerodon rubescens* (Labridae), using laser ablation ICP-MS of sagittal otoliths. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 403(1-2): 46-53.
- Fisher, S.J., Pyle, C.R. et Willis, D.W., 1999. Habitat use by age-0 yellow perch in two South Dakota glacial lakes. *Ecology of Freshwater Fish*, 8: 85-93.
- Fodrie, F.J. et Herzka, S.Z., 2008. Tracking juvenile fish movement and nursery contribution within and coastal embayments via otolith microchemistry. *Marine Ecology Progress Series*, 361: 253-265.
- Frenette, J.J., Arts, M.T. et Morin, J., 2003. Spectral gradients of downwelling light in a fluvial lake (Lake Saint-Pierre, St-Lawrence River). *Aquatic Ecology*, 37: 77-85.
- Frenette, J.J., Arts, M.T., Morin, J., Gratton, D. et Martin, C., 2006. Hydrodynamic control of the underwater light climate in fluvial Lac Saint-Pierre. *Limnology and Oceanography*, 51(6): 2632-2645.
- Frenette, M., Barbeau, C. et Verrette, J.-L., 1989. Aspects quantitatifs, dynamiques et qualitatifs des sédiments du Saint-Laurent, Hydrotech inc, Experts-conseils pour Environnement Canada et Gouvernement du Québec, Projet de mise en valeur du Saint-Laurent.

- Friedrich, L.A. et Halden, N.M., 2011. Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometric analyses of base metals in arctic char (*Salvelinus alpinus*) otoliths collected from a flooded base metal mine. *Environmental Science & Technology*, 45(10): 4256-4261.
- Fuiman, L.A. et Werner, R.G. (Editors), 2002. *Fishery Science : The Unique Contributions of Early Life Stages*. Blackwell Science, Oxford, 352 pp.
- Gillanders, B.M. et Kingsford, M.J., 1996. Elements in otoliths may elucidate the contribution of estuarine recruitment to sustaining coastal reef populations of a temperate reef fish. *Marine Ecology Progress Series*, 141: 13-20.
- Gillanders, B.M. et Kingsford, M.J., 2000. Elemental fingerprints of otoliths of fish may distinguish estuarine "nursery" habitats. *Marine Ecology Progress Series*, 201: 273-286.
- Gillanders, B.M., 2002a. Temporal and spatial variability in elemental composition of otoliths: implications for determining stock identity and connectivity of populations. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 59: 669-679.
- Gillanders, B.M., 2002b. Connectivity between juvenile and adult fish populations: do adults remain near their recruitment estuaries? *Marine Ecology Progress Series*, 240: 215-223.
- Glémet, H. et Rodriguez, M.A., 2007. Short-term growth (RNA/DNA ratio) of yellow perch (*Perca flavescens*) in relation to environmental influences and spatio-temporal variation in a shallow fluvial lake. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 64: 1646-1655.
- Graeb, B.D.S., Dettmers, J.M., Wahl, D.H. et Caceres, C.E., 2004. Fish Size and Prey availability Affect Growth, Survival, Prey Selection, and Foraging Behavior of Larval Yellow Perch. *Transactions of the American Fisheries Society*, 133: 504-514.
- Guénette, S., Mailhot, Y., McQuinn, I., Lamoureux, P. et Fortin, R., 1994. Paramètres biologiques, exploitation commerciale et modélisation de la population de perchaudes (*Perca flavescens*) du lac Saint-Pierre. Ministère de l'Environnement et de la Faune et Université du Québec à Montréal, Québec, pp. 110 + Annexes.
- Hartman, K.J. et Margraf, F.J., 1993. Evidence of predatory control of yellow perch (*Perca flavescens*) recruitment in Lake Erie, Usa. *Journal of Fish Biology*, 43: 109-119.

- Hedges, K.J., Ludsin, S.A. et Fryer, B.J., 2004. Effects of ethanol preservation on otolith microchemistry. *Journal of Fish Biology*, 64: 923-937.
- Hobbs, J.A., Bennett, W.A., Burton, J. et Gras, M., 2007. Classification of larval and adult delta smelt to nursery areas by use of trace elemental fingerprinting. *Transactions of the American Fisheries Society*, 136(2): 518-527.
- Houde, E.D., 1994. Differences between marine and freshwater fish larvae : implications for recruitment. *ICES Journal of Marine Science*, 51: 91-97.
- Humphreys Jr, R.L., Campana, S.E. et DeMartini, E.E., 2005. Otolith elemental fingerprints of juvenile Pacific swordfish *Xiphias gladius*. *Journal of Fish Biology*, 66: 1660-1670.
- La Violette, N., Fournier, D., Dumont, P. et Mailhot, Y., 2003. Caractérisation des communautés de poissons et développement d'un indice d'intégrité biotique pour le fleuve Saint-Laurent, 1995-1997. *Société de la faune et des parcs du Québec, Direction de la recherche sur la faune*, pp. 237.
- La Violette, N., 2004. Les lacs fluviaux du Saint-Laurent : Hydrologie et modifications humaines. *Le Naturaliste canadien*, 128(1): 98-104.
- Langlois, C., Lapierre, L., Léveillé, M., Turgeon, P. et Ménard, C., 1992. Synthèse des connaissances sur les communautés biologiques du lac Saint-Pierre. Rapport technique. Zone d'intérêt prioritaire. Centre Saint-Laurent, Conservation et Protection, Environnement Canada, pp. 236.
- Lawton, R.J., Wing, S.R. et Lewis, A.M., 2010. Evidence for discrete subpopulations of sea perch (*Helicolenus ercooides*) across four fjords in Fiordland, New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 44(4): 309-322.
- Leclerc, E., Mailhot, Y. et Bernatchez, L., 2007. Définition des populations de perchaudes (*Perca flavescens*) du fleuve Saint-Laurent au Québec : Analyse du patron géographique de la variation génétique et morphologique. In: d.P.e.d.l.A.d.Q. ministère de l'Agriculture (Editor). Rapport de recherche-développement no 155. Les publications de la Direction de l'innovation et des technologies, Québec, pp. 22.
- Leclerc, É., Mailhot, Y., Mingelbier, M. et Bernatchez, L., 2008. The landscape genetics of yellow perch (*Perca flavescens*) in a large fluvial ecosystem. *Molecular Ecology*, 17(7): 1702-1717.

- Leggett, W.C. et Deblois, E., 1994. Recruitment in marine fishes: is it regulated by starvation and predation in the egg and larval stages? *Netherland Journal of Sea Research*, 32: 119-134.
- Ludsin, S.A., Fryer, B.J. et Gagnon, J.E., 2006. Comparison of solution-based versus laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry for analysis of larval fish otolith microelemental composition. *Transactions of the American Fisheries Society*, 135: 218-231.
- Magnan, P., 2002. Avis scientifique sur l'état du stock de perchaudes au lac Saint-Pierre, les indicateurs biologiques utilisés pour effectuer son suivi et la pertinence de protéger la période de fraye de façon partielle ou totale. Société de la Faune et des Parcs du Québec, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, Québec, pp. 52.
- Mailhot, Y., Axelsen, F., Dumont, P., Fournier, H., Lamoureux, P., Pomerleau, C. et Portelance, B., 1987. Avis scientifique sur le statut de la population de la perchaude au lac Saint-Pierre. Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche du Québec et Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. Plan de gestion de la Pêche. Comité scientifique conjoint., pp. 26.
- Mailhot, Y., 1999. Document de réflexion sur la perchaude et la gestion de la pêche sportive et commerciale au lac Saint-Pierre. Direction régionale du centre-du-Québec. Faune et Parcs Québec, pp. 14.
- Millar, R.B., 1987. Maximum likelihood estimation of mixed stock fishery composition. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 44: 583-590.
- Millar, R.B., 1990a. Comparison of methods for estimating mixed stock fishery composition. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 47: 2235-2241.
- Millar, R.B., 1990b. A versatile computer program for mixed stock fishery composition estimation, *Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences* 1753. Pêche et Océans Canada, pp. 29.
- Milton, D.A. et Chenery, S.R., 1998. The effect of otolith storage methods on the concentrations of elements detected by laser-ablation ICPMS. *Journal of Fish Biology*, 53: 785-794.
- Milton, D.A. et Chenery, S.R., 2001. Sources and uptake of trace metals in otoliths of juvenil baramundi (*Lates calcarifer*). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 264: 47-65.

- Ministère du Conseil Exécutif, 1985. Le Saint-Laurent, ressource nationale prioritaire. Secrétariat Général, Québec.
- Ministère du Loisir de la Chasse et de la Pêche, M.L.C.P., 1983. Plan directeur pour la conservation et la mise en valeur de la région du lac Saint-Pierre (Version provisoire révisée), Gouvernement du Québec, Québec.
- Morin, J. et Bouchard, A., 2000. Les bases de la modélisation du tronçon Montréal / Trois-Rivières. *Rapport scientifique SMC-Hydrométrie RS-100*, Environnement Canada, Sainte-Foy, 56 p.
- Morin, J. et Côté, J.-P., 2003. Modification anthropiques sur 150 ans au lac Saint-Pierre : une fenêtre sur les transformations de l'écosystème du Saint-Laurent. *VertigO*, 4(3): 1-10.
- Nielsen, L.A., 1980. Effect of walleye *Stizostedion vitreum vitreum* predation on juvenile mortality and recruitment of yellow perch *Perca flavescens* in Oneida Lake, New York, Usa. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37: 11-19.
- Proctor, C.H. et Thresher, R.E., 1998. Effects of specimen handling and otolith preparation on concentration of elements in fish otoliths. *Marine Biology*, 131: 681-694.
- Quinn, G.P. et Keough, M.J., 2002. *Experimental design and data analysis for biologists*. Cambridge University Press, Cambridge, 537 pp.
- Ranaldi, M.M. et Gagnon, M.M., 2008. Trace metal incorporation in otoliths of black bream (*Acanthopagrus butcheri* Munro), an indicator of exposure to metal contamination. *Water, Air, and Soil Pollution*, 194(1-4): 31-43.
- Rondeau, B., Cossa, D., Gagnon, P., Pham, T.T. et Surette, C., 2005. Hydrological and biogeochemical dynamics of the minor and trace elements in the St. Lawrence River. *Applied Geochemistry*, 20(7): 1391-1408.
- Rooker, J.R., Secor, D.H., Zdanowicz, V.S., De Metrio, G., Orsi Relini, L., Deflorio, M., Santamaria, N., Palandri, G. et Relini, M., 2002. Otolith elemental fingerprints of Atlantic bluefin tuna from eastern and western nurseries. *Collective Volume of Scientific Papers*, 54(2): 498-506.
- Rudstam, L.G., Green, D., M., Forney, J.L., Stang, D.L. et Evans, J.T., 1996. Evidence of interactions between walleye and yellow perch in New York State lakes. *Annales Zoologici Fennici*, 33: 443-339.

- Ruttenberg, B.I., Hamilton, S.L., Hickford, M.J.H., Paradis, G.L., Sheehy, M.S., Standish, J.D., Ben-Tzvi, O. et Warner, R.R., 2005. Elevated levels of trace elements in cores of otoliths and their potential for use as natural tags. *Marine Ecology Progress Series*, 297(1): 273-281.
- Swearer, S.E., Forrester, G.E., Steele, M.A., Brooks, A.J. et Lea, D.W., 2003. Spatio-temporal and interspecific variation in otolith trace-elemental fingerprints in a temperate estuarine fish assemblage. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 56: 1111-1123.
- Thorrold, S.R. et Shuttleworth, S., 2000. In situ analysis of trace elements and isotope ratios in fish otoliths using laser ablation sector field inductively coupled plasma mass spectrometry. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 57: 1232-1242.
- Thorrold, S.R., Zacherl, D.C. et Levin, L.A., 2007. Population connectivity and larval dispersal using geochemical signatures in calcified structures. *Oceanography*, 20(3): 80-89.
- Trencia, G. et Langevin, B., 2008. Chronologie de la reproduction de l'éperlan arc-en-ciel dans le secteur de Beaumont. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de l'Aménagement de la Faune, Région de la Chaudière-Appalaches, pp. 7.
- Whitledge, G.W., 2009. Otolith microchemistry and isotopic composition as potential indicators of fish movement between the Illinois River drainage and Lake Michigan. *Journal of Great Lakes Research*, 35(1): 101-106.
- Wiens, J.A., 2002. Riverine landscapes: taking landscape ecology into the water. *Freshwater Biology*, 47(4): 501-515.
- Wilkinson, L., Blank, G. et Gruber, C., 1996. Desktop analysis with SYSTAT. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 848 pp.
- Zeigler, J.M. et Whitledge, G.W., 2010. Assessment of otolith chemistry for identifying source environment of fishes in the lower Illinois River, Illinois. *Hydrobiologia*, 638(1): 109-119.
- Zeigler, J.M. et Whitledge, G.W., 2011. Otolith trace element and stable isotopic compositions differentiate fishes from the Middle Mississippi River, its tributaries, and floodplain lakes. *Hydrobiologia*, 661(1): 289-302.

Zitek, A., Sturm, M., Waidbacher, H. et Prohaska, T., 2010. Discrimination of wild and hatchery trout by natural chronological patterns of elements and isotopes in otoliths using LA-ICP-MS. *Fisheries Management and Ecology*, 17(5): 435-445.

ANNEXE 1

COORDONNÉES GÉOGRAPHIQUES DES STATIONS D'ÉCHANTILLONNAGE

UTILISÉES POUR L'EMPREINTE ÉLÉMENTAIRE DES LARVES DU LAC

SAINT-PIERRE EN 2007

Tableau 9. Coordonnées géographiques des stations d'échantillonnage utilisées pour l'empreinte élémentaire des larves au lac Saint-Pierre en 2007

Secteur	# de la station	Date	Profondeur moyenne (m)	Coordonnées géographiques début		Coordonnées géographiques fin	
				Latitude	Longitude	Latitude	Longitude
Anse du Fort	75	07-juin-07	0,73	46,15177	-72,79222	46,15198	-72,79155
Anse du Fort	77	07-juin-07	0,80	46,14598	-72,80527	46,14812	-72,80061
Anse du Fort	79	07-juin-07	0,67	46,14647	-72,82172	46,14667	-72,82247
Anse du Fort	197	01-juin-07	1,23	46,13469	-72,86401	46,13496	-72,86536
Anse du Fort	200	11-juin-07	1,23	46,12999	-72,88620	46,13032	-72,88544
Anse du Fort	201X	11-juin-07	1,15	46,12484	-72,89427	46,12547	-72,89349
Anse du Fort	203	11-juin-07	1,27	46,13504	-72,90624	46,13543	-72,90697
Nicolet	56	08-juin-07	0,77	46,20205	-72,66195	46,20160	-72,66249
Nicolet	58	08-juin-07	0,75	46,19651	-72,67673	46,19609	-72,67734
Nicolet	62	30-mai-07	0,77	46,19000	-72,70853	46,18973	-72,70937
Nicolet	63	30-mai-07	0,72	46,18660	-72,71653	46,18652	-72,71722
Nicolet	64	30-mai-07	0,70	46,18210	-72,72506	46,18192	-72,72600
Nicolet	65	30-mai-07	0,67	46,18065	-72,73031	46,18059	-72,73143
Nicolet	164	08-juin-07	1,17	46,24263	-72,66928	46,24308	-72,66874
Nicolet	169	08-juin-07	1,18	46,21072	-72,66866	46,21029	-72,66929
Girodeau	100	28-mai-07	0,73	46,14139	-72,99595	46,14207	-72,99536
Girodeau	101	28-mai-07	0,77	46,14838	-72,99261	46,14907	-72,99226
Girodeau	102	28-mai-07	0,72	46,15489	-72,98803	46,15543	-72,98767
Maskinongé	4	06-juin-07	0,78	46,19030	-72,96067	46,19057	-72,96143
Maskinongé	5	06-juin-07	0,78	46,19495	-72,96832	46,19558	-72,96828
Maskinongé	6	06-juin-07	0,80	46,20038	-72,96303	46,20078	-72,96232
Maskinongé	7	06-juin-07	0,80	46,20562	-72,95833	46,20578	-72,95728
Maskinongé	8	06-juin-07	0,73	46,20698	-72,94980	46,20710	-72,94878
Maskinongé	10	06-juin-07	0,80	46,21570	-72,93695	46,21637	-72,93583
Maskinongé	11	06-juin-07	0,73	46,21767	-72,92897	46,21753	-72,92800
Maskinongé	123	06-juin-07	1,23	46,20592	-72,95216	46,20562	-72,95304
Maskinongé	124	06-juin-07	1,18	46,20733	-72,94315	46,20718	-72,94379
Yamachiche	25	31-mai-07	0,77	46,25953	-72,83113	46,25940	-72,83027
Yamachiche	26	31-mai-07	0,75	46,26205	-72,82355	46,26217	-72,82258
Yamachiche	141	31-mai-07	1,15	46,25918	-72,82475	46,25848	-72,82539

ANNEXE 2

**COORDONNÉES GÉOGRAPHIQUES DES STATIONS D'ÉCHANTILLONNAGE
UTILISÉES POUR L'EMPREINTE ÉLÉMENTAIRE DANS LE SECTEUR DE
BEAUMONT EN 2007**

Tableau 10. Coordonnées géographiques des stations d'échantillonnage utilisées pour l'empreinte élémentaire des larves dans le secteur de Beaumont en 2007

Secteur	# de la station	Date	Coordonnées géographiques	
			Début	Fin
Bassin Louise sud étal	30	18-mai-07	46,81873 -71,18537	46,82268 -71,18473
Beaumont pélagique baissant	18	18-mai-07	48,81845 -71,19452	46,82272 -71,19112
Pointe Orléans nord baissant	27	18-mai-07	46,84463 -71,13042	46,84315 -71,13145
Rabaska nord baissant	7	15-mai-07	46,84783 -71,09123	46,84733 -71,09022
Rabaska sud baissant	24	18-mai-07	46,83177 -71,09267	46,83257 -71,09303
Rivière Chaudière pélagique début montant	31B	18-mai-07	46,76017 -71,25373	46,76660 -71,24485
Ligne Hydro sud baissant	20	18-mai-07	46,83473 -71,05953	46,83497 -71,06057
Marina Sillery pélagique étal	31A	18-mai-07	46,78833 -71,21087	46,78838 -71,21545
Beaumont pélagique baissant	35	22-mai-07	46,85250 -70,99972	46,85467 -70,99068
Ligne Hydro sud baissant	37	22-mai-07	46,83470 -71,05983	46,83508 -71,06127
Ligne Hydro pélagique baissant	38	22-mai-07	46,84127 -71,05830	46,84272 -71,05112
Rabaska pélagique baissant	41	22-mai-07	46,84055 -71,09822	46,84058 -71,08938
Bassin Louise sud - montant	67	25-mai-07	46,81783 -71,18525	46,81393 -71,18718

ANNEXE 3

**COORDONNÉES GÉOGRAPHIQUES DES STATIONS D'ÉCHANTILLONNAGE
UTILISÉES POUR LA CONNECTIVITÉ ENTRE LES JUVÉNILES ET LES
LARVES DU LAC SAINT-PIERRE EN 2007**

Tableau 11. Coordonnées géographiques des stations d'échantillonnage utilisées pour la connectivité entre les juvéniles et les larves au lac Saint-Pierre en 2007

Secteur	# de la station	Date	Profondeur moyenne (m)	Coordonnées géographiques	
				Latitude	Longitude
Anse du Fort	1	16-oct-07	0,85	46,13145	-72,88358
Anse du Fort	2	16-oct-07	0,85	46,13180	-72,88995
Anse du Fort	4	16-oct-07	0,80	46,14300	-72,89598
Anse du Fort	5	16-oct-07	1,12	46,14078	-72,88334
Anse du Fort	6	16-oct-07	1,35	46,14309	-72,88080
Anse du Fort	7	16-oct-07	1,65	46,14814	-72,87859
Anse du Fort	9	16-oct-07	Donnée manquante	46,14119	-72,88325
Nicolet	1	17-oct-07	0,80	46,20951	-72,72112
Nicolet	2	17-oct-07	0,80	46,20521	-72,72438
Nicolet	3	17-oct-07	1,10	46,20500	-72,72672
Girodeau	2	25-oct-07	1,80	46,14076	-72,98998
Maskinongé	2	25-oct-07	1,15	46,20215	-72,94654
Maskinongé	3	25-oct-07	1,30	46,19999	-72,94310
Maskinongé	4	16-oct-07	1,60	46,19041	-72,93466
Maskinongé	5	16-oct-07	1,85	46,18996	-72,93275
Maskinongé	7	25-oct-07	1,15	46,21111	-72,93484
Maskinongé	8	25-oct-07	1,40	46,20993	-72,93456
Maskinongé	9	25-oct-07	1,60	46,20803	-72,93266
Yamachiche	1	18-oct-07	0,85	46,25006	-72,84329
Yamachiche	2	18-oct-07	1,10	46,24844	-72,84315
Yamachiche	3	18-oct-07	1,35	46,24689	-72,84251
Yamachiche	4	18-oct-07	1,60	46,24243	-72,84180
Yamachiche	6	18-oct-07	0,85	46,25491	-72,82938
Yamachiche	10	18-oct-07	0,80	46,25234	-72,83781
Yamachiche	12	18-oct-07	0,80	46,25011	-72,84151

