

Université du Québec
Institut National de la Recherche Scientifique
Centre Eau Terre Environnement

INCLUSION DE LA THERMIE DANS UN MODÈLE GÉNÉRALISTE DE L'HABITAT DU SAUMON ATLANTIQUE AU STADE TACON, PAR L'ENTREMISE DE LA LOGIQUE FLOUE

Par
Joannie Beaupré
B. Sc. Biologie

Mémoire présenté pour l'obtention
du grade de de Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de la Terre

Le vendredi 22 Février 2019

Jury d'évaluation

Examineur externe	Cindy Breau Pêches et Océans Canda Gouvernement du Canada
Examineur interne	Patrice Couture
Directeur de recherche	André St-Hialire
Codirecteur de recherche	Normand Bergeron

DÉDICACES ET REMERCIEMENTS

Ce mémoire est dédié aux Premières Nations qui m'ont permis d'exercer mes travaux sur leurs terres et leurs rivières dans le but d'amenuiser une infime partie des erreurs du passé. *Wliwni* à la Nation Waban-Aki qui m'a ouvert les bras et offert ma première chance sur le marché du travail.

Merci à la Fondation pour la Conservation du Saumon atlantique et Mitacs accélération, sans qui cette maîtrise n'aurait peut-être jamais décollée. Je salue également la Fondation Saumon qui a vu l'énorme potentiel de ce projet et qui a soufflé dans mes voiles, juste au bon moment.

André, comme tu le sais, la maîtrise a été pour moi un remous d'incertitudes, parsemé de petites chutes et de beaux défis. Je reconnais, après tout, que ce projet est ma plus belle réalisation à ce jour. Tu as, en tout professionnalisme, apporté une touche « paternelle » à ce projet, avec tes bons mots, ta patience, ton écoute et ta volonté de m'amener toujours plus loin. Merci pour ton efficacité, ton leadership sans égal et toute cette confiance que tu as eue en mes capacités. Une nouvelle étape commence pour moi, je suis prête et tu en es pour beaucoup.

Normand, merci de m'avoir « challengée » pendant ces deux années. Tu m'as appris à avoir confiance en mon équipe et le sens du « let it go ». « Il y a toujours une solution, il faut être créatif »!

Mes experts(!) ceux que j'ai « harcelés » si ce n'est pas 100 fois, ce n'est pas une fois, merci pour votre temps, vos conseils, vos connaissances et surtout votre patience à comprendre cette logique qui porte si bien son nom. Je tiens à souligner le travail formidable qu'a réalisé Julien Mocq sur la logique floue. Chaque mot, si bien choisi, a servi de boué à la biologiste que je suis dans cet océan de mathématiques.

Que ce soit pour l'ardeur aux travaux de terrain, votre précieux temps, votre patience à endurer mes mauvais jours ou simplement pour l'amitié que nous avons formée, Hermine, Jérémie B., Fatima, Chau, Carole-Anne, Rosemarie, Seb, Danielle, Anik, Dora, « Maunonke », les stagiaires d'été et le personnel de soutien de l'INRS, je vous remercie.

Merci à tous ces gens merveilleux qui m'entourent : à ma sœur, pour cette conversation tranchante qui m'a convaincue de faire le grand saut à ce dur moment de ma vie, à mon frère pour le support à distance, à mes ami(e)s qui m'ont suivie dans cette relation « amour-haine » qu'a été la maîtrise et à tous ces gens qui m'ont fait sentir aussi brillante que Darwin, parfois même sans comprendre ce que je faisais.

Mention spéciale à l'équipe incroyable que forment mon père et ma mère. Je ne peux rien promettre, mais je crois que cette fois-ci les études sont terminées pour vrai! Merci de m'avoir appris l'importance de travailler fort, de persévérer et de toujours vouloir faire mieux. Le savoir-être que vous m'avez transmis est à la base de toutes mes grandes réussites. Chacune d'elles vous sont dédiées et particulièrement celle-ci.

Finalement, merci G pour nos folies qui m'ont permis de décrocher, pour ton support constant et ton calme inébranlable. Le parcours aurait été beaucoup plus abrupt sans toi, mon pilier, qui rend les petits échecs encore plus banals et les victoires pleines de sens.

Petite note à la jeune *Moi* en 2016, qui manque de confiance et qui hésite à se lancer par peur d'échouer : DANS TES DENTS.

RÉSUMÉ

Ce mémoire présente les étapes qui ont permis l'amélioration d'un modèle de qualité d'habitat du saumon atlantique au stade de tacon. L'amélioration passait par l'ajout de la température de l'eau comme variable déterminante de la qualité de l'habitat pour les juvéniles, et ce, par l'entremise de la logique floue. Le projet comportait deux étapes principales. D'abord, la consultation d'experts du saumon afin de colliger leurs connaissances sur l'habitat des tacons, puis la validation du modèle à partir de données récoltées sur les rivières Sainte-Marguerite, Matapédia et Petite-Cascapédia. Dans un contexte de contraste thermique, le modèle suggère qu'une température fraîche offre une meilleure qualité d'habitat. Cependant, les résultats indiquent que lorsqu'ils ont le choix, les tacons évitent les zones particulièrement froides ($<15\text{ }^{\circ}\text{C}$) et chaudes ($>20,5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Cependant, lorsque la température dépasse $21\text{ }^{\circ}\text{C}$, 42 % plus de tacons utilisent le refuge froid que le chenal principal de la rivière. Le modèle a été validé pour moins de 60 % des sondages en raison de l'absence de contrastes thermiques significatifs sur les sites restants. Néanmoins, il existe une corrélation significative entre l'indice de qualité d'habitat médian et la densité de tacons par site pour la rivière Sainte-Marguerite ($R^2 = 0,38$). Une corrélation plus faible, mais significative (F-test ; $p = 0,036$), est observée pour la rivière Petite-Cascapédia ($R^2 = 0,14$). Le modèle à quatre variables (incluant la température de l'eau) explique davantage la densité relative de tacons qu'un modèle similaire à trois variables incluant seulement la profondeur d'eau, la vitesse de l'écoulement et la taille du substrat.

Mots-clés: Logique floue; modèle de qualité d'habitat; saumon atlantique; tacon; température de l'eau

ABSTRACT

This thesis presents the steps that led to the improvement of a habitat model for Atlantic salmon parr. The model improvement involved using fuzzy logic to add water temperature as a key variable for juveniles' habitat. The project had two main objectives. The first one was to gather expert knowledge and create membership functions to represent parr habitat with four variables: water temperature, water depth, flow velocity and substrate size. The second objective was to validate the model with data sets collected on the Sainte-Marguerite, Matapedia and Petite-Cascapedia rivers. In a context of thermal contrast, the resulting model suggests that cold temperature generally offers better habitat quality. However, the results indicate that when they have the choice, parrs seem to avoid cold areas ($<15\text{ }^{\circ}\text{C}$) and warm areas ($>20.5\text{ }^{\circ}\text{C}$). However, when temperatures exceed $21\text{ }^{\circ}\text{C}$, 42 % more parrs use the cold refugia than the main channel of the river. Although the model has been validated for less than 60 % of surveys, there is a significant correlation, in the absence of thermal contrast, between the median habitat quality index and the parr density on Sainte-Marguerite ($R^2 = 0.38$). The correlation on Petite-Cascapedia River is lower ($R^2 = 0.14$), albeit significant (F-test; $p = 0.036$) However, our four-variable model explains more parr relative densities than a similar model with three variables, excluding temperature.

Keywords: Fuzzy logic; Habitat quality model; Atlantic salmon; parr; water temperature

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACES ET REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ	V
ABSTRACT.....	VI
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES FIGURES.....	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
1 INTRODUCTION.....	13
1.1 MISE EN CONTEXTE.....	14
1.2 OBJECTIFS DE RECHERCHE	17
1.3 DIVISION DU MEMOIRE	17
1.4 CHANGEMENT CLIMATIQUE ET EFFET SUR LA THERMIE DE L'EAU.....	18
1.4.1 <i>Changements passés et futurs.....</i>	<i>18</i>
1.4.2 <i>Effet des changements climatiques dans l'aire de répartition des saumons atlantiques.....</i>	<i>19</i>
1.5 EFFETS ET PREFERENCES DE LA THERMIE CHEZ LES SALMONIDES.....	20
1.5.1 <i>Effet du choc thermique sur la croissance et la survie.....</i>	<i>21</i>
1.5.2 <i>Les préférences thermiques des saumons atlantiques juvéniles.....</i>	<i>22</i>
1.5.3 <i>Stratégie comportementale de survie des tacons.....</i>	<i>23</i>
1.5.4 <i>Les refuges thermiques</i>	<i>25</i>
1.6 CONSTRUCTION D'UN MODELE D'HABITAT	26
1.6.1 <i>L'approche classique par micro-habitat.....</i>	<i>26</i>
1.6.2 <i>Intégration de la logique floue « multi-expert » à la modélisation d'habitat.....</i>	<i>29</i>
1.6.3 <i>Les étapes de modélisation avec la logique floue.....</i>	<i>31</i>
1.7 LA TEMPERATURE DE L'EAU DANS LES MODELES D'HABITATS DU SAUMON.....	38
2 SYNTHÈSE DE LA DEMARCHE SCIENTIFIQUE	41
2.1 METHODOLOGIE DES ACTIVITES DE RECHERCHE	42
2.1.1 <i>Construction des ensembles flous.....</i>	<i>42</i>

2.1.2	<i>Validation partielle du modèle</i>	46
2.2	RESULTATS.....	54
2.2.1	<i>Modèles d'experts</i>	54
2.2.2	<i>Habitats</i>	55
2.2.3	<i>Pêche électrique</i>	58
2.2.4	<i>Validation du modèle en présence d'un contraste thermique</i>	58
2.2.5	<i>Validation en fonction de la densité relative par site</i>	59
2.3	DISCUSSION.....	61
2.4	CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS.....	66
	RÉFÉRENCES	69
3	ARTICLE	82
3.1	INTRODUCTION.....	86
3.2	METHODOLOGY.....	89
3.2.1	<i>Multi-experts model</i>	89
3.2.2	<i>Field sampling</i>	92
3.2.3	<i>Model application</i>	96
3.2.4	<i>Model validation</i>	99
3.3	RESULTS.....	101
3.3.1	<i>Experts based model</i>	101
3.3.2	<i>Habitat characterization</i>	102
3.3.3	<i>Electrofishing</i>	107
3.3.4	<i>Model application and validation</i>	107
3.4	DISCUSSION.....	110
3.5	REFERENCES.....	115
	ANNEXE I	119
	ANNEXE II	136

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1-1 : SCHEMATISATION DES ETAPES PRINCIPALES DE LA CONSTRUCTION D'UN MODELE D'HABITAT CLASSIQUE AVEC LA METHODE DES MICRO-HABITATS EN COMBINANT UN MODELE HYDRAULIQUE ET UN MODELE BIOLOGIQUE. SOURCE : PROST <i>ET AL.</i> (2014).....	27
FIGURE 1-2 : SCHEMATISATION DES ENSEMBLES FLOUS CONSTRUITS POUR DELIMITER LES PARAMETRES DE QUATRE CATEGORIES REPRESENTANT LA VARIABLE « NOMBRE D'ANNEES D'UTILISATION »	32
FIGURE 1-3 : SCHEMATISATION DES CONCEPTS DE DEGRE D'ACTIVATION (FLECHE ROUGE HORIZONTALE), DE DEGRE D'IMPLICATION ET DE LA DEFUZZIFICATION PAR LA METHODE DU CENTRE DE GRAVITE (*) ET CE LORSQUE TOUTES LES VALEURS ENTRANTES DANS LE MODELE APPARTIENNENT TOTALEMENT A UNE CATEGORIE.....	36
FIGURE 1-4 : SCHEMATISATION DES CONCEPTS D'AGREGATION ET DE LA DEFUZZIFICATION PAR LA METHODE DU CENTRE DE GRAVITE (*) RELATIVE A L'UTILISATION DE PLUSIEURS REGLES LORSQU'UNE OU PLUSIEURS LES VALEURS ENTRANT DANS LE MODELE SE TROUVENT DANS LA ZONE FLOUE.	37
FIGURE 2-1 : SYSTEME FLOU FICTIF POUR LA VARIABLE DE TEMPERATURE.....	45
FIGURE 2-2 : SCHEMATISATION DES ELEMENTS CLES D'UN SITE D'ECHANTILLONNAGE. IMAGE INSPIREE DU MAGAZINE SAUMON© VOLUME 41/No 3, AUTOMNE 2018 P. 33	47
FIGURE 2-3 : ÉVOLUTION DES PANACHES D'EAU FROIDE POUR LES SITES A ET B (RIVIERE SAINTE-MARGUERITE), SUR TROIS JOURNEES DIFFERENTES EN 2018. LE CROISEMENT DE L'ABSCISSE ET DE L'ORDONNEE REPRESENTE LA CONFLUENCE DU TRIBUTAIRE ET DE LA RIVIERE PRINCIPALE. L'ORDONNÉE REPRÉSENTE LA DISTANCE VERS L'AVAL.....	56
FIGURE 3-1 : EXAMPLE OF FUZZY SETS DEFINED BY AN EXPERT FOR THE VELOCITY.....	90
FIGURE 3-2 : FICTITIOUS SITE TO REPRESENT THE SAMPLING MODEL. A SITE IS COMPOSED OF A COOLER AREA USUALLY GENERATED BY THE INFLOW OF A TRIBUTARY AND A CORRESPONDING WARMER AREA, WITH ROUGHLY THE SAME SIZE. IN BOTH AREAS, SEVERAL PATCHES WITH AN AREA OF 0.79 m ² ARE SAMPLED FOR DEPTH, VELOCITY, SUBSTRATE SIZE AND TEMPERATURE, IN PRESENCE AND ABSENCE OF FISH. FIGURE INSPIRE BY MAGAZINE SAUMON, © VOLUME 41/No 3, FALL 2018 P. 33.....	93
FIGURE 3-3 : SITES MAP.....	94
FIGURE 3-4 : SITE A OBSERVED TEMPERATURES FROM UPSTREAM AT THE CONFLUENCE OF A COLD TRIBUTARY IN SAINTE-MARGUERITE RIVER WITH THE SEEK THERMAL XR© DEVICE. LEFT OF THE DOTTED LINE IS THE BANK WHILE AT THE RIGHT IT IS POSSIBLE TO OBSERVE THE THERMAL PLUME. IN PALE AND DARK PURPLE: COLD AREA AND IN ORANGE: WARM AREA.	95
FIGURE 3-5 : IMPLICATION CONCLUSION FUNCTION ASSOCIATED WITH A UNIQUE RULE	98
FIGURE 3-6 : IMPLICATION AND AGGREGATION OF TWO CONCLUSION FUNCTIONS ASSOCIATED WITH TWO RULES .	99
FIGURE 3-7 : SITES MAP FOR THE SECOND DATA SET ON SAINTE-MARGUERITE AND PETITE-CASCAPEDIA RIVERS	101

FIGURE 3-8 : A) LINK BETWEEN RELATIVE DENSITY AND HSI FOR THE MODEL WITH TEMPERATURE (BLUE) AND WITHOUT TEMPERATURE (ORANGE) FOR THE SAINTE-MARGUERITE RIVER AND B) THE PETITE-CASCAPÉDIA RIVER.....	109
FIGURE A1 : FONCTIONS LINEAIRE DECROISSANTE (A), TRIANGULAIRE (B), TRAPEZOÏDALE (C) ET CROISSANTE LINEAIRE (D), ET LES PARAMETRES LES DEFINISSANT.....	123
FIGURE A2 : LES EXPERTS AURONT A DELIMITER TROIS FONCTIONS D'APPARTENANCE (« PAUVRE », « MOYENNE » ET « ELEVEE ») POUR L'INDICE DE QUALITE D'HABITAT.....	125
FIGURE A3 : EXEMPLE DE GRAPHIQUE ISSU DES FONCTIONS DECRITES PAR LES PARAMETRES DE TEMPERATURE DE L'EAU DU TABLEAU A 1. POUR CHAQUE VALEUR INDIVIDUELLE DE LA VARIABLE (EX. 10 °C), LA SOMME DES DEGRES D'APPARTENANCE SERA SYSTEMATIQUEMENT EGALE A 1. EN D'AUTRES TERMES, LORSQU'UNE FONCTION D'APPARTENANCE ATTEINT LA VALEUR 1, LES AUTRES FONCTIONS ONT NECESSAIREMENT LA VALEUR 0.....	127
FIGURE A4 : REGLE 36 DU TABLEAU A 3 QUI SERA COMPLETE PAR LES EXPERTS	129
FIGURE A5 : DISPOSITION DU RESEAU DE THERMORGRAPHES SUR LE SITE B A L'ETE 2017. IMAGE CREEE PAR ÈVE BILODEAU AVEC LE LOGICIEL AUTOCAD ©.....	137
FIGURE A6 :DISPOSITION DU RESEAU DE THERMORGRAPHES SUR LE SITE A A L'ETE 2017. IMAGE CREEE PAR ÈVE BILODEAU AVEC LE LOGICIEL AUTOCAD ©.....	138

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1-1 SEUILS, OPTIMUM ET LIMITES DE TEMPERATURE POUR LE SAUMON ATLANTIQUE POUR LES STADES JUVENILES.....	23
TABLEAU 2-1 : NOMS DES CATEGORIES POUR CHACUNE DES VARIABLES D'ENTREE ET DE SORTIE	43
TABLE 3-1 : MEDIANS AND RANGES (MAXIMUM AND MINIMUM) OF SELECTED LIMITS FOR FUZZY SETS DEFINING THE CATEGORIES OF HABITAT VARIABLES.....	103
TABLE 3-2 : AVERAGE SUMMER WATER TEMPERATURE IN THE MAIN CHANNEL AND IN THE TRIBUTARY FOR STUDY SITES FROM JULY 4TH TO SEPTEMBER 20 TH 2017	103
TABLE 3-3 : MEDIAN VALUES FOR EACH SAMPLED VARIABLE AND PARR DENSITY (STANDARDIZED ON 100 M ²) IN THE DIFFERENT AREAS (WARM AND COLD) FOR EACH ELECTROFISHING SURVEY.	105
TABLE 3-4 : THE MOST FREQUENTLY USED RULES.....	105
TABLE 3-5 : MEDIAN HSI FOR BOTH WARM AND COLD AREAS OF EACH SITE, ACCORDING TO THE 20 EXPERTS ...	106
TABLE 3-6 : PREFERRED PARR PHYSICAL HABITAT (SYMONS & HELAND, 1978; BAGLINIÈRE <i>ET AL.</i> , 1987; GIBSON, 1993; DUMAS & PROUZET, 1994; HELAND & DUMAS, 1994; HEGGENES <i>ET AL.</i> , 1999; ARMSTRONG <i>ET AL.</i> , 2003).....	113
TABLEAU A1 : EXEMPLE D'UNE TABLE COMPLETEE AVEC LES VALEURS DES PARAMETRES DES FONCTIONS POUR LA TEMPERATURE ET DE SUBSTRAT.....	127
TABLEAU A2 : PARAMETRES DELIMITANT LES FONCTIONS D'APPARTENANCE DES VALEURS DE 4 VARIABLES D'HABITAT ET DE L'IQH A 3 CATEGORIES.....	132
TABLEAU A3 : ENSEMBLE DES REGLES FLOUES POUR LE TACON DU SAUMON ATLANTIQUE	133

1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

Les changements anticipés du climat auront des conséquences écologiques à court et à long terme et font déjà sentir leurs effets dans les biomes à l'échelle du globe (GIEC, 2014). L'écologie des eaux marines et des eaux douces soulève plusieurs inquiétudes auprès des environmentalistes. Dans ce contexte, plusieurs espèces de poissons, comme le saumon atlantique (*Salmo salar*), sont à risque de perdre une partie de leur habitat (Jonsson & Jonsson, 2009). Répandu de part et d'autre de l'océan Atlantique, le saumon est une espèce anadrome grandement étudiée dans le but de mieux comprendre sa distribution en rivière et plus récemment, en mer.

Le saumon atlantique est un emblème au sein de la culture nord-américaine et particulièrement pour celle du Québec. Cette province compte plus de 111 rivières à saumons en plus des nombreux tributaires utilisés par cette espèce (MFFP, 2016). En 2010, l'industrie de la pêche récréative au saumon atlantique sauvage a été évaluée à 255 millions de dollars, en plus de générer 3 872 emplois à temps plein et près de 10 500 emplois saisonniers (Pinfold & Federation, 2011). Un déclin alarmant guette plusieurs populations sauvages dont certaines ont complètement disparu telles que la population de la Baie de Fundy (Noakes *et al.*, 2000; Lackey, 2003; Trzcinski *et al.*, 2004).

Bien que les menaces entourant la décroissance des stocks sont dues à un grand nombre de facteurs (perte et dégradation de l'habitat naturel en rivière, pression de pêche durant la période de croissance en mer, changement d'utilisation du sol, déforestation, construction de barrages et autres obstacles, modification du régime thermique des cours d'eau; Caissie, 2006), il est globalement accepté qu'une température en dehors des seuils tolérables peut causer des mortalités massives de poissons (Fry, 1947; Garside, 1973; Graham & Harrod, 2009; Elliott & Elliott, 2010). La température de l'eau est susceptible d'augmenter dans les années à venir et celle-ci est

cruciale pour le bon fonctionnement et la survie des salmonidés (Jonsson & Jonsson, 2009; GIEC, 2014; Yi *et al.*, 2017). En effet, les saumons, comme la plupart des espèces de poissons, sont des organismes ectothermes, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas en mesure de réguler leur température interne. La température du milieu externe conditionne donc leurs fonctions métaboliques et immunitaires. Cette variable influence, entre autres, le comportement et la distribution des poissons à l'échelle du cours d'eau, en plus d'influencer sa répartition géographique (Ebersole *et al.*, 2003; Crozier *et al.*, 2008).

L'état précaire des populations et le rythme des changements environnementaux amènent les gestionnaires et les chercheurs à multiplier les efforts de conservation en développant, entre autres, des modèles de préférences d'habitat. Ces modèles tentent de cibler l'utilisation de l'environnement aquatique par les saumons en considérant des variables déterminantes de la qualité de l'habitat (Yi *et al.*, 2017). Ce sont également des outils nécessaires afin d'évaluer quantitativement la disponibilité des habitats (Ahmadi-Nedushan *et al.*, 2006). Bien qu'il existe une grande variété de modèles d'habitat traitant les différentes échelles du paysage (micro- ; méso- ;macro-habitat), les plus utilisés sont basés sur des courbes de préférences construites à partir de mesures effectuées localement sur une seule rivière (Leclerc *et al.*, 1996; Guay *et al.*, 2000). Par conséquent, cette approche requiert une charge de travaux techniques importante (Yi *et al.*, 2017).

L'élaboration des modèles d'habitat basés sur les connaissances d'experts s'avère une option intéressante afin de réduire la charge et les coûts relatifs au travail de terrain (Annear *et al.*, 2002). Plusieurs modèles « multi-experts » ont été développés par l'entremise de la logique floue (Jorde *et al.*, 2001; Ahmadi-Nedushan *et al.*, 2008; Mocq *et al.*, 2013). Cette approche mathématique permet de codifier des connaissances approximatives et de modéliser une partie de l'incertitude relative au discernement par catégories (p. ex. : qualité d'habitat « faible » ou « moyenne »). Il existe de nombreux avantages à employer cette approche, par exemple la simplicité d'utilisation ou encore

la facilité à intégrer de l'information autre que des données de terrain. En effet, l'information intégrée au modèle relève des connaissances d'experts ayant travaillé sur une vaste gamme d'habitats et de rivières. Cette information est donc relativement facile à obtenir lorsque l'on compare au temps et aux coûts relatifs aux inventaires sur le terrain. Puisque les modèles des experts sont indépendants et analysés séparément, le modèle global issu de la mise en commun de cette expertise se voudrait « généraliste », soit potentiellement exportable à plusieurs cours d'eau (Mocq *et al.*, 2013). Cette particularité éviterait d'avoir à développer un modèle propre à chaque rivière, représentant une économie de temps colossale. L'approche de type logique floue est donc plus que pertinente dans un contexte où les changements, climatiques et anthropiques, se font rapidement et que la modélisation d'habitat se doit d'être réalisée dans un court laps de temps.

En plus de demander une charge de travail de terrain importante, les modèles développés pour le saumon atlantique comportent d'autres lacunes telles que l'omission de la température de l'eau comme variable déterminant la qualité de l'habitat. Les seuils et les optimums de température pour les saumons et les salmonidés en général sont assez bien connus et acceptés (Elliott, 1991; Jonsson *et al.*, 2001). Les mouvements des tacons vers les refuges thermiques et leur importance durant les événements de stress thermique ont été le sujet de plusieurs études dans les dernières années (Breau *et al.*, 2007; Wilbur, 2012; Dugdale *et al.*, 2013; Monk *et al.*, 2013). Cependant, l'effet de la température de l'eau sur la qualité et la sélection d'habitats a rarement été intégré dans un modèle d'habitat de cette espèce (Scruton & Gibson, 1993; Leclerc *et al.*, 1994; Guay *et al.*, 2000; Hedger *et al.*, 2004). Quelques auteurs ont tenté de l'inclure (p. ex. Stanley & Trial, 1995), d'autres l'ont considéré par l'entremise d'une composante de croissance basée sur la température de l'air (Caron *et al.*, 1999). Considérant les conséquences qu'auront les changements climatiques et anthropiques sur la température de l'eau, en plus de l'information grandissante sur cette variable dans les bases de données, celle-ci ne devrait plus être négligée davantage.

Les modèles d'habitat généraliste sont aujourd'hui et seront dans le futur des outils pertinents au succès des plans de conservation faunique (Armstrong *et al.*, 2003; Yao *et al.*, 2017) en plus de réduire la charge de travail relative aux méthodes de modélisation classiques.

1.2 Objectifs de recherche

L'objectif principal du projet était d'améliorer un modèle généraliste de l'habitat du saumon atlantique pour le stade de tacon. Le premier objectif spécifique était d'inclure la température de l'eau dans un modèle existant afin de prédire la qualité et la quantité d'habitats pour les tacons. Cette étape a été complétée en codifiant les connaissances de plusieurs spécialistes du saumon atlantique par l'entremise de la logique floue. Le deuxième objectif spécifique était de valider partiellement le nouveau modèle selon deux méthodes. La première méthode était de comparer la qualité de l'habitat, tel que défini par les experts, avec des données de densités relatives de tacons dans des zones thermiquement contrastées d'un même site, et ce, sur quatre sites différents. La deuxième méthode était d'évaluer la densité relative en fonction de la qualité d'habitat générée par le modèle pour une soixantaine de sites, sur deux rivières différentes. Les hypothèses qui ont guidé ce projet de recherche étaient donc que la température influence la qualité de l'habitat selon les experts et que la température influence la sélection d'un habitat par les jeunes saumons.

1.3 Division du mémoire

Les sections 1.3 à 1.6 inclusivement tracent un portrait partiel, mais juste, de la situation du saumon atlantique dans un contexte de changements climatiques. Entre autres, les effets d'une température sous-optimale sur les tacons et les préférences d'habitats acceptées sont présentés. De plus, les efforts liés à la conservation de cette espèce,

traduits par la diversité des outils développés, seront mis en lumière en comparant la méthode classique de modélisation par micro-habitat et la méthode suggérée dans le cadre de ce projet. La section 2.0 présente la démarche, les résultats et discussions de l'étude de cas effectuée de septembre 2016 à mai 2018, dans le but de réaliser l'objectif principal et les objectifs spécifiques décrits à la section 1.2. Dans le but d'alléger le mémoire, les figures et des tableaux référés dans cette section sont issus de l'article scientifique présenté dans la section 3.0 et n'ont pas été insérés en double. L'article sera soumis subséquemment à l'acceptation du présent mémoire.

1.4 Changement climatique et effet sur la thermie de l'eau

1.4.1 Changements passés et futurs

Les changements climatiques altèrent, entre autres, les régimes hydrologique, thermique et éolien, etc. Le régime hydrologique fait référence, par exemple, aux précipitations solides ou liquides, à l'évaporation et à leur influence directe ou indirecte sur les débits. Le régime éolien réfère plutôt au système des grands vents comme les courants-jets (*jet stream*) polaires et subtropicaux. Le régime thermique fait référence aux variations de température de l'air et des systèmes aquatiques. L'activité humaine est largement pointée comme cause première de ces changements. En effet, les émissions massives de gaz à effet de serre ainsi que la déforestation et la pollution sous toutes ses formes sont responsables du réchauffement et des autres dérèglements climatiques à la surface de la Terre (GIEC, 2014). Il est suggéré que le phénomène des changements climatiques serait une « boucle de rétroaction positive » c'est-à-dire que la réponse climatique des changements amplifie le phénomène (Heimann & Reichstein, 2008).

Entre la fin des années 1800 et le début des années 2000, la température de l'air à la surface du globe s'est réchauffée en moyenne de 0,85 °C [0,65-1,06]. Puisque les

océans absorbent une grande partie de l'énergie thermique de l'atmosphère, il est estimé que la température dans les premiers 75 m de profondeur d'eau s'est réchauffée en moyenne de 0,11 °C par décennie durant la période 1971 à 2011 (GIEC, 2014). Entre autres, cette énergie emmagasinée accélère la fonte des glaces et pourrait hypothétiquement entraîner à long terme le ralentissement de la circulation thermohaline, le système de convection planétaire qui a pour effet de tempérer le climat à la surface du globe.

Les perturbations que subit le régime thermique des océans affectent, entre autres, le régime des vents et les précipitations. Plusieurs endroits à l'échelle du globe subissent des événements météorologiques extrêmes tels que les canicules et les sécheresses (Kunkel *et al.*, 2008; Perkins *et al.*, 2012), alors que d'autres endroits sont victimes d'une augmentation des précipitations et des inondations (Sousa *et al.*, 2011). Il semble que la durée et la fréquence de tels événements augmenteront et que le rythme auquel les changements surviendront s'accroîtra (Coumou & Rahmstorf, 2012). Les prévisions suggèrent une augmentation probable entre 1,5 et 2 °C de la température moyenne de l'air d'ici la fin du 21^e siècle et que la température de l'océan continuera d'augmenter ce qui déstabilisera davantage les systèmes climatiques (GIEC, 2014).

1.4.2 Effet des changements climatiques dans l'aire de répartition des saumons atlantiques

Les changements climatiques ont une composante régionale et saisonnière (Dutra *et al.*, 2011; Deser *et al.*, 2012). En effet, les différentes parties du monde ne sont pas affectées au même rythme et à la même intensité. L'aire de répartition des saumons est à risque d'être sérieusement affectée. Les saumons atlantiques naissent dans les rivières au nord du fleuve Hudson (É.U.), en Amérique, et du fleuve Miño (Portugal) en Europe (Gueguen & Prouzet, 1994). Puis, ils migrent vers l'Atlantique Nord pour s'alimenter, croître et atteindre la maturité sexuelle.

Les moyennes d'augmentation de la température de l'air pour les régions nordiques dépassent nettement la moyenne d'augmentation à la surface du globe. Une augmentation moyenne de 1,5 °C a été observée depuis 1990 (Morice *et al.*, 2012) alors qu'on pourrait encore être témoin d'une augmentation de 3 à 6 °C jusqu'en 2100. On prévoit, pour les saisons hivernales futures, une augmentation des précipitations ainsi que des températures plus douces (Graham & Harrod, 2009), ce qui pourrait avoir comme effet des crues printanières précoces et plus importantes. En contrepartie, les étés seront, toujours selon les prédictions, plus secs et plus chauds, ce qui aura pour effet la réduction du ruissellement, de la recharge des nappes phréatiques et des débits en rivière. Finalement, en ce qui concerne la température de l'eau, les prédictions suggèrent une augmentation moyenne de 2 à 3 °C (GIEC, 2014) d'ici le début du prochain siècle, sans compter les événements de chaleurs extrêmes qui se multiplieront.

1.5 Effets et préférences de la thermie chez les salmonidés

Depuis quelques décennies, les limites et les tolérances thermiques des salmonidés ont soulevé beaucoup d'intérêt (Symons & Heland, 1978; Baglinière *et al.*, 1987; Heggenes, 1990; Elliott, 1991; Gibson, 1993; Dumas & Prouzet, 1994; Heland & Dumas, 1994; Armstrong *et al.*, 2003). Les salmonidés sont reconnus pour avoir des préférences d'habitat physique bien délimitées pour plusieurs variables (ex. la profondeur de l'eau, la taille du substrat, la vitesse du courant, la température ; Armstrong *et al.*, 2003). Bien que certaines espèces soient plus tolérantes que d'autres (p. ex. *Salmo salar* ; Garside, 1973), il semble que la température de l'eau en rivière s'avère particulièrement fatale lorsqu'elle est en dehors des limites tolérables. Face aux événements extrêmes, les salmonidés ont développé des adaptations locales pour assurer leur survie (Dionne *et al.*, 2008).

1.5.1 Effet du choc thermique sur la croissance et la survie

La température est une variable qui influence largement les réactions métaboliques des poissons (Jonsson *et al.*, 2001; Aas *et al.*, 2010). Comme tous les poissons, les salmonidés sont des animaux à sang froid, ce qui signifie qu'il n'y a aucune régulation de température interne et que seule la température du milieu externe conditionne les réactions anaboliques et cataboliques. Le fonctionnement optimal du métabolisme des ectothermes est restreint à une fourchette de températures limitée (Breau *et al.*, 2011). En s'écartant légèrement de cette plage, l'efficacité des réactions diminue alors que la demande en oxygène et la respiration augmentent (Farrell *et al.*, 2009). Si la température est trop élevée, la demande en oxygène devient telle, que la respiration anaérobie doit compenser pour assurer la survie de l'organisme (Pörtner & Farrell, 2008). Cette transition implique une réaction nommée « stress thermique » (Elliott, 1991), causé par la réduction des réserves de glycogène et l'augmentation d'acide lactique dans les muscles (Iwama *et al.*, 1999; Breau *et al.*, 2011). Pour tenter de s'acclimater à un tel stress (Olsvik *et al.*, 2013) et contrer les effets négatifs des déchets métaboliques de la respiration anaérobie, il y a libération de protéines de choc thermique et de cortisol (Iwama *et al.*, 1999; Basu *et al.*, 2002; Lund *et al.*, 2002). Toutefois, la présence de ces molécules dans le système supprime la synthèse de nouvelles protéines cellulaires (Parsell & Lindquist, 1993), trouble ainsi le développement et réduit la résistance aux maladies dues à l'effet immunosuppresseur du cortisol (Pickering & Pottinger, 1985; Fast *et al.*, 2008). En outre, les mouvements (comportement d'évitement de prédation, natation à contre-courant) et l'alimentation sont compromis par le stress thermique (Quigley & Hinch, 2006; Steinhausen *et al.*, 2008). L'habileté et l'aise à accomplir ces activités par les individus, dès les premiers stades de vie, influencent la croissance et ainsi leur futur succès reproducteur et le maintien d'une population (Jonsson & Jonsson, 2009; Elliott & Elliott, 2010).

1.5.2 Les préférences thermiques des saumons atlantiques juvéniles

Les préférences thermiques des salmonidés ont été étudiées à plusieurs reprises en laboratoire, bien souvent dans des contextes d'acclimatation, c'est-à-dire que les seuils et les limites des poissons ont été testés en fonction de l'acclimatation à différents paliers de température. Les différents auteurs sont d'avis que l'intervalle de température optimal pour le saumon atlantique au stade de tacons se trouverait entre 15 et 19 °C (Elson, 1969; DeCola, 1970; Stanley & Danie, 1983; Elliott, 1991). À ces températures, l'alimentation et donc la croissance seraient optimales. Le tableau 1-1 présente les principaux seuils de température influençant le comportement, l'alimentation et la survie des saumons atlantiques juvéniles. Pour bien comprendre à quel stade de vie il est question dans ce tableau, il est pertinent de se référer sommairement au cycle de vie du saumon sauvage.

La fraie du saumon atlantique se produit durant l'automne où les œufs sont déposés dans le gravier pour y incuber tout l'hiver. Les larves émergent au printemps et passent leur premier été en rivière à s'alimenter. Durant cette période, les juvéniles sont nommés « alevins ». Le second stade juvénile, le stade de tacon, peut commencer dès la fin du premier été (tacon 0+) ou au début du printemps suivant (tacon 1+). Ce stade se poursuit jusqu'à la smoltification, correspondant aux transformations physiques et physiologiques que subissent les jeunes afin de survivre et de s'alimenter en mer (Hansen & Quinn, 1998). Le stade de saumoneau peut être atteint dès le 3^e ou 4^e printemps dans certaines rivières au sud de l'aire de répartition et aussi tard qu'au 7^e ou 8^e printemps lorsqu'on s'approche de la limite nord.

Les valeurs présentées dans le tableau 1-1 ont été colligées à partir d'expériences en laboratoire (Elliott, 1991; Jonsson & Jonsson, 2009; Elliott & Elliott, 2010) et d'expériences en rivières menées par (Breau *et al.*, 2007)..

Tableau 1-1 Seuils, optimum et limites de température pour le saumon atlantique pour les stades juvéniles

Seuils	Définitions	Température (°C)	
		Tacons 0+ à 1+	Tacons 1+ 2+
Température létale ultime inférieure	Les individus survivent pour une courte période de temps (1 000 min.)	1,0 *	-
Température létale initiale inférieure	Les individus peuvent survivre pour une période prolongée (7 jours)	0 - 2,2 *	-
Limite d'alimentation inférieure	Les individus cessent de s'alimenter	3,8 – 7 *	-
Optimal de croissance	La température à laquelle la croissance est maximum.	16	15 -19 (DeCola, 1990)
Comportements thermorégulateurs	Les individus commencent à migrer vers des refuges tempérés	**	22 - 24 (Breau <i>et al.</i> , 2007)
Limite d'alimentation supérieure	Les individus cessent de s'alimenter	21,6 - 22,5 *	-
Température létale initiale supérieure	Les individus peuvent survivre pour une période prolongée (7 jours)	24,8 - 27,8 *	-
Température létale ultime supérieure	Les individus peuvent survivre sur courte période de temps (10 min.)	29,9 - 33 *	-

*Pour des températures d'acclimations entre 5 et 27° C.

**Dans Breau *et al.* 2007, les 0+ n'ont pas migré vers les refuges thermiques.

1.5.3 Stratégie comportementale de survie des tacons

Durant l'été, lorsque les températures sont dans la zone tolérable pour les fonctions métaboliques des juvéniles (7-22 °C ; tableau 1), ceux-ci adoptent un comportement territorial où ils défendent un endroit avantageux dans le cours d'eau pour l'alimentation (Keenleyside & Yamamoto, 1962). À ce moment, plusieurs variables guident leurs choix d'habitat (McCormick *et al.*, 1998). En effet, la distribution des juvéniles serait liée à la vitesse du courant, la profondeur de la colonne d'eau, la taille du substrat, la

topographie et la largeur du cours d'eau (DeGraaf & Bain, 1986; Morantz *et al.*, 1987; Heggenes, 1990; Caron & Talbot, 1993; Scruton & Gibson, 1993).

Les tacons utilisent généralement une vitesse moyenne dans la colonne d'eau entre 0,10 et 0,65 m/s (Heggenes, 1990). Il est suggéré que les préférences pour la vitesse du courant sont associées au comportement d'alimentation. Les jeunes saumons adoptent principalement leur stratégie d'alimentation en fonction de la disponibilité des proies et du type de substrat (Stradmeyer & Thorpe, 1987). Ils peuvent adopter un comportement de « fouille » (*foraging*) qui consiste à chercher activement des proies dans le substrat et dans la colonne d'eau. Ils peuvent aussi adopter un comportement d'alimentation de dérive (*drift feeding*) qui consiste à repérer les proies dans le courant à partir de leur roche (*home rock*), nager rapidement pour aller la chercher et revenir se positionner au même endroit. L'alimentation de dérive serait plus efficace quand le courant est un peu plus rapide (0,50 à 0,65 m/s ; Symons & Heland, 1978). Les tacons utilisent généralement des profondeurs entre 0,20 et 0,70 m et préfèrent un substrat plutôt grossier, entre 64 et 512 mm. Lorsque le courant est rapide, un substrat hétérogène et grossier offre plus de protection et de cachettes pour économiser de l'énergie (Heggenes *et al.*, 1999). Bien que ces valeurs soient généralement acceptées pour ces variables, il semble que celles-ci ont moins d'importance lorsque les tacons sont en stress thermique.

Pour contrer les évènements de température extrême, les jeunes saumons ont développé des stratégies comportementales afin d'augmenter leurs chances de survie. Une de ces stratégies est le déplacement vers des sources d'eau tempérées afin d'optimiser leur métabolisme et augmenter leur chance de survie lors des épisodes de chaleur intense (Gibson, 1966; Cunjak *et al.*, 2005; Breau *et al.*, 2007; Gendron, 2013). Alors que les jeunes de l'année (*young of the year ; YOY*) semblent moins affectés par le stress thermique (McDonald *et al.*, 1998; Breau *et al.*, 2007), les tacons 1+ et 2+ sont activement à la recherche de sources d'eau fraîche afin d'assurer leur survie (Cunjak *et al.*, 2005; Breau *et al.*, 2007). Willmer *et al.* (2009) La tolérance des YOY serait

expliquée par le rapport surface/volume élevé de leur corps (Breau *et al.*, 2007; Willmer *et al.*, 2009). Rimmer *et al.* (1983) ont également décrit ce comportement de recherche active d'un abri tempéré chez les tacons exposés à de trop faibles températures.

1.5.4 Les refuges thermiques

Les refuges thermiques sont générés par une gamme complexe de processus. Ils sont, entre autres, formés par les résurgences hyporhéiques et l'eau fraîche en provenance des tributaires qui se déverse dans une rivière (Ebersole *et al.*, 2003). Le déversement d'un affluent forme, dans la rivière réceptrice, un panache habituellement plus frais s'écoulant vers l'aval. En général, les petits ruisseaux ont un apport proportionnel d'eau souterraine plus important que les grandes rivières et ont une fermeture de futaie plus élevée que les cours d'eau d'ordre élevés (Kaleris, 1998). Dugdale *et al.* (2015) ont révélé un réseau important de refuges thermiques sur plusieurs rivières de l'est du Canada notamment pour les rivières Cains, Northwest Miramichi et dans le bassin versant la rivière Restigouche au Québec et Nouveau-Brunswick (NB). Dans la province de Québec, le réseau de refuges des rivières Sainte-Marguerite (Saguenay) et Ouelle (Bas-Saint-Laurent) et Matapédia ont également été inventoriés. Plusieurs auteurs ont clairement démontré leur importance pour les saumons juvéniles lors des événements de chaleur extrême (Gibson, 1966; Berman & Quinn, 1991; Breau *et al.*, 2007; Breau *et al.*, 2011; Dugdale *et al.*, 2013). En effet, l'utilisation d'une source d'eau tempérée en période de chaleur extrême, ne serait-ce que durant quelques heures, permettrait à plusieurs saumons de récupérer et d'éviter la mort (FOC, 2012). Considérant que la température de l'eau est sujette à atteindre la « température létale initiale supérieure » (27,8 °C) dans certaines rivières de l'est canadien (Gendron, 2013; Jeong *et al.*, 2013) et que la fréquence des événements extrêmes est à risque d'augmenter, la préservation de ces refuges en utilisant des outils adéquats est plus que d'intérêt.

1.6 Construction d'un modèle d'habitat

Plusieurs modèles ont été créés afin de lier les différentes variables d'habitat à la distribution du saumon atlantique en eau douce, permettant ainsi d'évaluer la quantité et la qualité de ces habitats (Scruton & Gibson, 1993; Leclerc *et al.*, 1996; Lamouroux *et al.*, 1999; Guay *et al.*, 2000; Mäki-Petäys *et al.*, 2004; Ahmadi-Nedushan *et al.*, 2006). Il existe différentes démarches pour construire des modèles d'habitat. La modélisation classique utilise les courbes de préférence générées par la méthode des micro-habitats. Elle est l'approche la plus utilisée de toutes (Yi *et al.*, 2017), mais comporte certaines lacunes. Parmi ces inconvénients, on compte la difficulté à transférer les modèles d'une rivière à l'autre, mais également la charge de travail laborieuse relative à la récolte de données permettant de tracer les courbes de préférences. La logique floue est une approche envisageable pour pallier ces problématiques.

1.6.1 L'approche classique par micro-habitat

Comme illustré à la figure 1-1, les modèles d'habitat pour les poissons sont généralement issus de l'utilisation conjointe d'un modèle hydraulique et d'un modèle biologique (Bourgeois *et al.*, 1996; Gibbins & Acornley, 2000; Ayllón *et al.*, 2012). Cette approche est connue sous le nom de *Instream Flow Incremental Method* (Bovee *et al.*, 1998). En ce qui concerne les modèles d'habitat propre aux salmonidés, les variables à l'étude sont généralement la profondeur de l'eau, la vitesse du courant et la taille du substrat. Le modèle hydraulique permet de prédire l'évolution de certaines variables comme la profondeur de l'eau et la vitesse du courant en fonction des variations de débit. Le modèle biologique révèle plutôt les intervalles de valeurs préférés ou évités par les poissons pour ces mêmes variables. Lorsqu'utilisés ensemble, ces modèles prédisent l'impact des variations de débits sur la quantité et la qualité des aires de vie pour les poissons. La méthode classique par micro-habitats est la plus utilisée pour générer un modèle biologique. Cette méthode est principalement basée sur des données de terrain demandant un effort d'échantillonnage important en rivière.

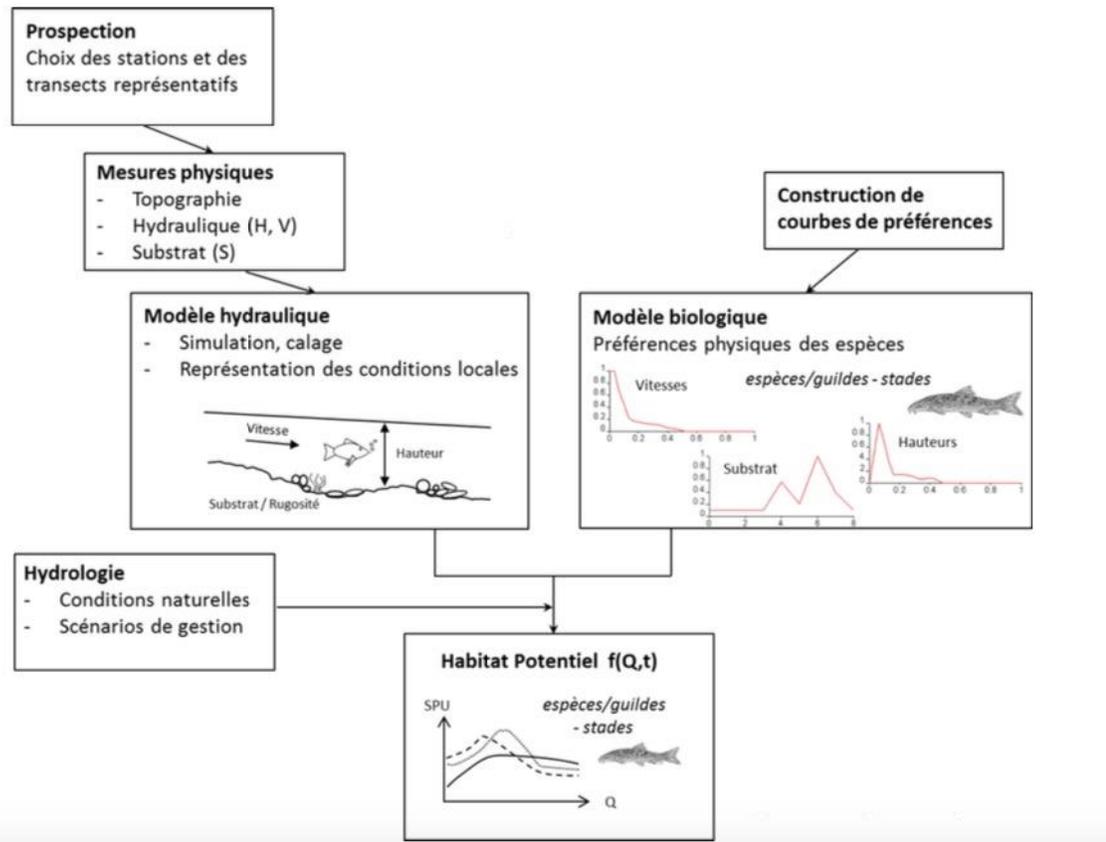


Figure 1-1 : Schématisation des étapes principales de la construction d'un modèle d'habitat classique avec la méthode des micro-habitats en combinant un modèle hydraulique et un modèle biologique. Source : Prost *et al.* (2014).

Le modèle hydraulique doit être calé sur un tronçon pour évaluer les variables en fonction d'un débit donné sur plusieurs parcelles équidistantes d'une surface prédéterminée et constante prenant la forme d'un maillage (« unité de maille » ; Prost *et al.*, 2014). La taille du substrat est généralement considérée comme étant constante.

En parallèle, des inventaires de poissons sont réalisés soit en apnée ou par pêche électrique et les différentes variables d'intérêt au modèle sont mesurées en absence et en présence de tacons dans chaque maille échantillonnée (Yi *et al.*, 2017). Pour construire les courbes de préférences d'habitat univariées, un Indice de Qualité d'Habitat (IQH) pondéré est attribué aux valeurs en fonction des présences et des absences de poissons par parcelle échantillonnée. L'IQH est une valeur entre 0 (habitat

inadéquat) et 1 (habitat idéal). Pour chaque maille, les courbes de préférences univariées peuvent être combinées en un indice composite par différentes méthodes (p. ex. moyenne géométrique ; Boudreau *et al.*, 1996 ; Parasiewicz & Dunbar, 2001). Cet IQH composite permet d'estimer la surface potentiellement utilisable par l'espèce que l'on nomme « aire pondérée utile » (APU). Les APU de chaque maille sont additionnées pour donner l'APU totale de la surface échantillonnée. Au final pour une section de rivière, lorsque l'on combine le modèle hydraulique et le modèle de préférence biologique, on obtient une valeur d'habitat en fonction du débit.

HABSCORE¹, PHABSIM², Estimhab³ comptent parmi plusieurs modèles construits avec cette approche. Plusieurs efforts ont été mis dans les dernières années afin d'améliorer la composante hydraulique des modèles (Leclerc *et al.*, 1994), alors que la composante biologique nécessite également une attention particulière. En effet, cette dernière est souvent trop spécifique aux adaptations locales des populations et est difficilement transposée à d'autres cours d'eau (Guay *et al.*, 2003; Millidine *et al.*, 2016). Le faible potentiel de transférabilité des modèles implique que les campagnes d'échantillonnage sont valides seulement à l'échelle du bassin versant ou de la rivière utilisée pour construire le modèle (ci-après nommée « rivière modélisée »). Cependant, par restrictions de temps et de budget, les campagnes d'échantillonnage sont limitées. Le saumon atlantique est une espèce considérablement plastique (Taylor, 1991). Ainsi, les populations sont souvent conditionnées par la disponibilité des habitats de chaque rivière (Mocq *et al.*, 2013) ce qui fait en sorte qu'on peut le retrouver dans des habitats très variables. Le potentiel de transférabilité et l'efficacité du modèle sont donc étroitement liés au degré d'homogénéité des habitats de la rivière modélisée. Dans le cas où l'application du modèle se fait sur une rivière très différente de la rivière

¹ HABitat quality SCORE; Milner *et al.*, 1991 National River Authority

² Physical HABitat SIMulation ; Waddle *et al.*, 2001

³ ESTIMATION de l'impact sur l'HABitat aquatique de la gestion des cours d'eau ; Sabaton, 2003

modélisée, l'adaptation de celui-ci s'avère presque aussi laborieuse que la construction d'un nouveau (Jowett & Davey, 2007).

Certains modèles ont été développés à l'échelle régionale, en utilisant les données de plusieurs rivières (Scruton & Gibson, 1993; Lamouroux *et al.*, 1999; Parasiewicz & Dunbar, 2001; Mäki-Petäys *et al.*, 2004). Ce genre de modèle a l'avantage de pouvoir être appliqué aux rivières pour lesquelles aucune relation entre les paramètres physiques et l'utilisation de l'habitat n'a été établie. Cependant, puisque la géomorphologie des rivières varie généralement d'une région à l'autre (Milner *et al.*, 1995), les modèles régionaux sont encore limités par le fait que les relations utilisées pour calibrer le modèle ne se retrouvent pas sur le cours d'eau où celui-ci est appliqué (Hedger *et al.*, 2004). Les modèles régionaux, par rapport aux modèles locaux, semblent établir de meilleures relations entre les paramètres et l'utilisation de l'habitat lorsqu'ils sont transférés à d'autres cours d'eau (Hedger *et al.*, 2004).

1.6.2 Intégration de la logique floue « multi-expert » à la modélisation d'habitat

Dans l'optique d'affranchir les modèles biologiques de la nécessité de développer des courbes de préférence locales, Ahmadi-Nedushan *et al.* (2008) et Mocq *et al.* (2013) ont travaillé sur des modèles d'habitat du saumon atlantique basés sur l'avis de plusieurs experts. La connaissance des répondants a été formatée à l'aide de la logique floue afin d'associer des valeurs de variables d'habitat à un indice de qualité (Zadeh, 1965; Salski, 1999; Bouchon-Meunier, 2007). Les modèles précédemment développés considèrent trois variables d'entrée soit, la profondeur de l'eau, la vitesse du courant et la taille du substrat, ainsi qu'une variable de sortie, l'IQH. Ces deux modèles d'habitats du saumon étaient eux-mêmes inspirés de la mise en pratique du modèle CASIMIR (Computer Aided Simulation Model for Instream Flow Requirements ; Jorde *et al.* 2001), un modèle de qualité d'habitat utilisé principalement pour la truite commune (*Salmo trutta*).

Ahmadi-Nedushan *et al.* (2008) a d'abord testé le modèle pour deux stades de vie du saumon atlantique soit les adultes en frai et les tacons. Ces recherches ont permis d'analyser la sensibilité des règles floues sur un système considérant l'avis de six experts. Puis, Mocq *et al.* (2013) ont amélioré le modèle par l'ajout d'un stade de vie (alevins), l'ajout d'un nombre considérable d'experts (30 experts au total) et en estimant l'incertitude entourant ce modèle. Entre autre, il a été montré que l'origine des experts était importante pour la cohérence du modèle. En effet, limiter la provenance de l'information à une région où les gabarits de rivière sont similaires (Mocq *et al.*, 2013) permettrait de réduire l'incertitude associée à l'attribution des paramètres du système flou. Puisque le système élaboré par chaque expert est considéré séparément, l'incertitude entourant l'IQH final peut être mesurée. En outre, des informations d'entrée (*input*) provenant d'un peu partout à l'intérieur d'une région géographique déterminée (ex. l'est du Canada, l'Amérique du Nord, Europe, etc.) permettraient donc de généraliser le modèle à plusieurs cours d'eau de cette région.

La mise en œuvre d'un modèle d'habitat flou est similaire à celle d'un modèle d'habitat classique, c'est-à-dire qu'il peut être utilisé conjointement avec un modèle hydraulique pour prédire les IQH et l'APU par site selon l'évolution des variables en fonction du débit. Cependant, au lieu d'utiliser des données de terrain pour construire des « courbes de préférences », on se fie aux connaissances de plusieurs spécialistes du saumon pour créer des « courbes d'appartenance ». L'expérience des experts est considérée comme une large base de données même si elle se base sur de l'information approximative et imprécise (Mocq, 2013). La logique floue permet de traiter des catégories regroupées en intervalles de valeurs, plutôt que des valeurs précises pour qualifier les habitats et les variables qui les définissent (Zadeh, 1965). Les termes qualitatifs sont intéressants à utiliser puisqu'ils reflètent l'ambiguïté de la manière humaine de raisonner, mais également la grande capacité d'interprétation du cerveau humain (Fazey *et al.*, 2006; Mocq, 2013). Les deux sous-sections suivantes décrivent les principales étapes de la démarche utilisée par Ahmadi-Nedushan *et al.* (2008) et par Mocq *et al.* (2013). C'est également celle-ci qui a guidé le projet présenté dans ce mémoire.

1.6.3 Les étapes de modélisation avec la logique floue

La logique floue peut être appliquée à divers contextes, comme la modélisation écologique (Adriaenssens *et al.*, 2004) ou l'évaluation du risque financier (Von Altrock, 1996). Puisque l'habitat des juvéniles du saumon atlantique est un sujet largement discuté dans ce mémoire, une mise en contexte indépendante sera utilisée pour expliquer les étapes de la logique floue. Voici donc un exemple de modèle flou **sur la valeur de revente d'un véhicule**.

La fuzzification

La première étape lors de la conception d'un modèle floue se nomme la fuzzification et consiste à questionner des experts sur des variables d'intérêt au sujet étudié ainsi que l'impact de ces variables sur une variable de sortie lorsqu'elles sont combinées.

Il faut d'abord sélectionner les variables qui permettront de prédire la variable de sortie qui, dans ce contexte, est la valeur de revente d'un véhicule. Ces variables d'entrée seraient, par exemple, le nombre d'années d'utilisation et le prix initial de la voiture. Les experts impliqués doivent décortiquer les variables d'entrée en catégories à l'aide de gammes de valeurs plus ou moins précises. Un ensemble flou (ou système flou) est la juxtaposition des fonctions floues représentant les catégories d'une variable comme illustrée à la figure 1-2. Les catégories pour le nombre d'années d'utilisation pourraient être par exemple « récente », « usagée », « vieille », « ancienne ».

Pour chaque valeur d'une variable en abscisse, un degré d'appartenance (DA) à une catégorie est attribué en ordonnée. Un degré d'appartenance est généralement entre **0** (la valeur n'appartient pas à la catégorie) et **1** (la valeur appartient pleinement à la catégorie).

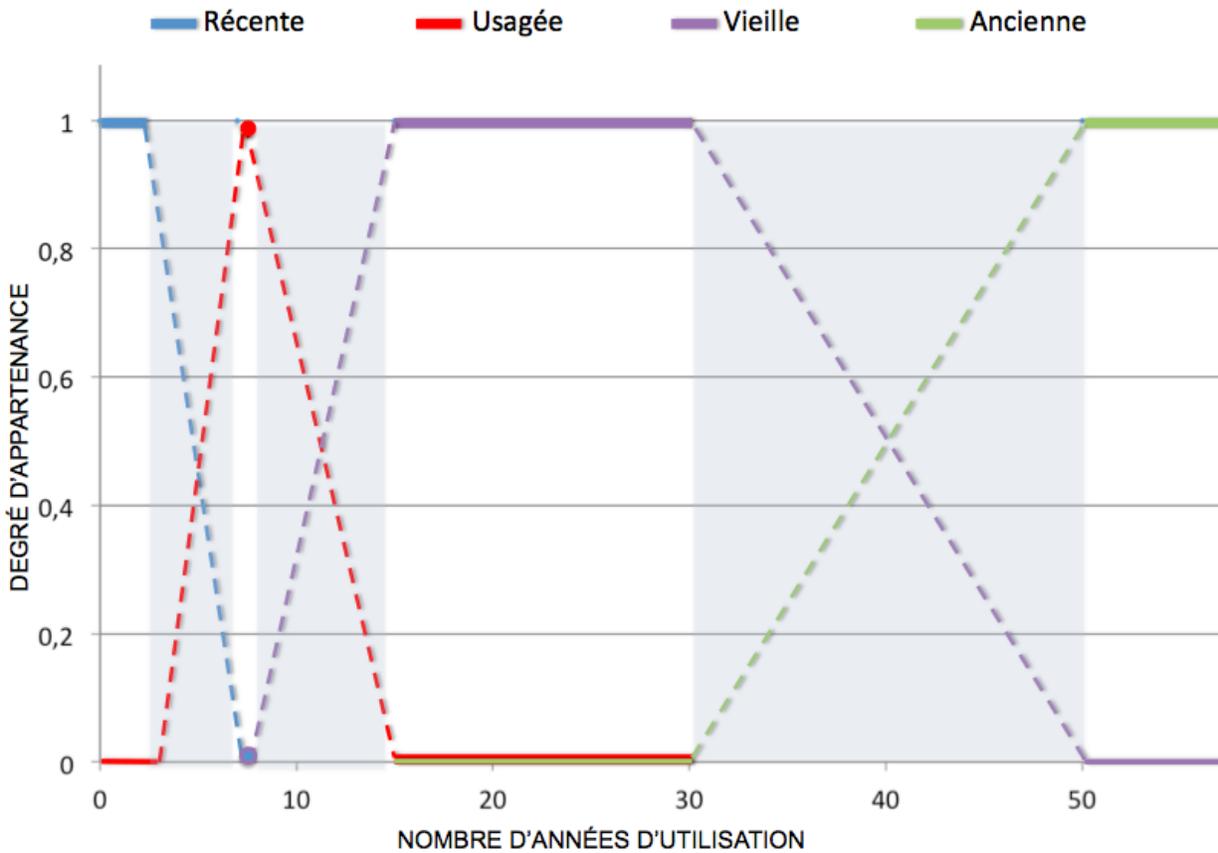


Figure 1-2 : Schématisation des ensembles flous construits pour délimiter les paramètres de quatre catégories représentant la variable « Nombre d'années d'utilisation ».

Selon un expert, une voiture de deux ans et moins pourrait être qualifiée de « récente », une voiture ayant sept ans d'utilisation pourrait être « usagée », une voiture ayant entre 15 à 30 ans pourrait être « vieille », alors qu'une voiture de plus de 50 ans pourrait être qualifiée d'« ancienne ». Les plages de valeurs représentant ces catégories sont judicieusement déterminées par le truchement de connaissances et d'observations. Il est plus facile pour les experts de cibler les plages de valeurs pour lesquelles ils sont certains de l'appartenance à une catégorie (DA=1).

Comme montré par les sections ombragées à la figure 1-2, il existe des intervalles nommés « zones floues », dont les valeurs ont un degré d'appartenance différent

de 0 et de 1. En l'occurrence, l'expert est incertain de l'appartenance à une ou l'autre des catégories.

Il existe entre les catégories une relation d'interdépendance permettant de modéliser une partie de l'incertitude des experts. Cette relation est expliquée par le fait qu'une valeur peut appartenir à 100 % à une seule catégorie. Toujours à la figure 1-2, on remarque que les valeurs appartenant totalement à la catégorie « vieille » en mauve (DA=1), n'appartiennent pas du tout à la catégorie « usagée » en rouge ou encore à la catégorie « ancienne » en verte (DA=0). Les lignes pointillées mettent en relation les intervalles ayant un DA de 1 et un DA de 0 d'une même fonction, ce qui permet aux valeurs dans la zone floue d'appartenir proportionnellement à deux catégories en même temps (Jorde *et al.*, 2001).

Tout comme les variables d'entrées, la variable de sortie doit être modélisée par un ensemble flou. Dans ce contexte-ci, les catégories à délimiter pour prédire la valeur de revente seraient « faible », « moyenne » et « élevée ».

Plusieurs formes de fonctions sont utilisables pour définir les degrés d'appartenance d'une variable, mais dans le cadre de ce projet, les fonctions linéaires (trapézoïdale et triangulaire) ont été utilisées puisqu'elles sont les plus communes et les plus intuitives. Une fonction trapézoïdale est utilisée lorsque plusieurs valeurs appartiennent totalement à une catégorie comme pour la catégorie « vieille » sur la figure 1-2. Autrement, une fonction triangulaire peut être utilisée lorsqu'une seule valeur appartient totalement à une catégorie, telle est le cas de la fonction d'appartenance de catégorie « usagée » à la figure 1-2. Il existe également les fonctions linéaires associées (croissante et décroissante) représentées par les catégories « récente » et « ancienne » respectivement.

Une fois les systèmes flous construits, les catégories des variables sont combinées pour former des règles floues. Les termes linguistiques (récente, usagée, etc.) sont liés par des opérateurs (« SI », « ET ») et les experts doivent déterminer la conséquence sur la valeur de revente faible, moyenne ou élevée, qui résulte des différentes combinaisons. La conséquence (lié par l'opérateur « ALORS ») prend aussi la forme linguistique à l'aide des catégories préalablement délimitées. Dans le contexte de l'exemple présenté, une règle floue pourrait prendre la forme suivante.

SI le prix de la voiture initiale est faible,

ET SI la voiture est usagée,

ALORS, la valeur de revente sera faible⁴.

Évidemment, il existe plusieurs autres variables permettant d'évaluer une valeur de revente d'un véhicule et la réponse peut être relative, par exemple au pays dans lequel le sondage est effectué ou par rapport à la classe sociale du répondant. C'est pourquoi il est important d'établir un contexte clair autour du modèle (p. ex. la valeur de revente au Canada pour des voitures de 50 000 dollars et moins). Afin de bien saisir l'enjeu, il faudrait avoir des spécialistes de cette classe de voiture provenant de chaque province canadienne.

Implication, agrégation et défuzzification

Les étapes qui suivent correspondent à la « mise en marche » du modèle. C'est-à-dire qu'à partir de valeurs d'entrée précises (p. ex. une voiture d'une valeur initiale de 20 000 \$ ayant sept années d'utilisation), on peut prédire une valeur numérique de revente. Pour y arriver, il faut passer par des étapes intermédiaires, soit l'activation, l'implication et l'agrégation (facultative). L'étape finale se nomme la défuzzification.

⁴ Ou moyenne, ou élevée, selon l'expert.

Les modèles préalablement construits par les experts sont formatés à l'aide de logiciel de programmation (ex. MatLab ; Fuzzy logic toolbox). L'implication et la défuzzification sont réalisées pour chaque ensemble de valeurs d'entrée, en tenant compte des systèmes flous de chaque expert séparément.

Dans ce contexte, et dans le contexte des activités de recherche présentées à la section 2, l'opérateur utilisé pour lier les combinaisons est le « ET » (dans un autre contexte, il serait possible d'utiliser l'opérateur « OU »). Pour l'opérateur « ET », **le degré d'activation** correspond au plus faible degré d'appartenance appliqué à une valeur, toutes variables confondues. Le degré d'activation détermine le degré d'appartenance maximale de la fonction conclusion, soit l'**implication** de la fonction conclusion. La fonction conclusion, complète (si le degré d'activation = 1) ou retranchée (si le degré d'activation < 1), est utilisée pour réaliser l'étape finale, soit la défuzzification. Il existe plusieurs méthodes de **défuzzification** permettant d'obtenir une valeur numérique finale. La plus utilisée est le centre de gravité de l'aire sous la courbe de la fonction conclusion (Janikow, 1998).

Les ensembles de données caractérisant une voiture dont on veut connaître la valeur de revente (p. ex. valeur initiale de 20 000 \$ et sept ans d'utilisation) sont des valeurs pouvant appartenir totalement ou en partie à des catégories délimitées par les experts. Puisque les experts délimitent les catégories avec différents paramètres, le nombre de règles floues s'appliquant à un ensemble de valeurs varie d'un expert à l'autre.

Si les valeurs des deux variables d'entrée appartiennent totalement à **une seule catégorie**, comme illustré à la figure 1-3, le degré d'appartenance minimum (c.-à-d. le degré d'activation, représenté par la flèche rouge horizontale) est de 1. Par conséquent, le degré d'implication de la fonction conséquence est de 100 % (représenté par la zone ombragée). Autrement dit, l'entièreté de l'aire sous la courbe de la fonction conséquence sera considérée pour déterminer le montant de la valeur de revente. Dans

ce cas-ci, c'est la méthode du centre de gravité qui est utilisée pour obtenir la valeur finale, hypothétiquement représentée par l'étoile (*) ; figure 1-3).

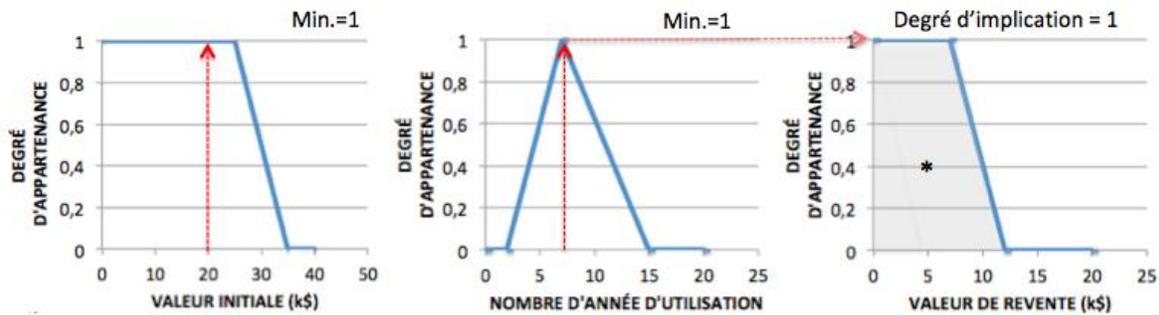


Figure 1-3 : Schématisation des concepts de degré d'activation (flèche rouge horizontale), de degré d'implication et de la défuzzification par la méthode du centre de gravité (*) et ce lorsque toutes les valeurs entrantes dans le modèle appartiennent totalement à une catégorie.

Lorsqu'une ou plusieurs valeurs se retrouvent dans la zone floue (c.-à-d. appartiennent à **deux catégories en même temps**), plusieurs règles sont nécessaires pour tracer la fonction conséquence. Dans le cas où les valeurs des deux variables se retrouveraient dans la zone floue, quatre règles floues seraient nécessaires pour tracer la fonction conséquence. Dans le cas de la figure 1-4, une seule valeur se trouve dans la zone floue et donc, deux règles sont nécessaires. Comme mentionné ci-haut, le degré d'implication de chaque sous-fonction conséquence est déterminé par le degré d'activation, soit le degré d'appartenance minimum attribué pour cette règle. La fonction conséquence globale est tracée en faisant une agrégation des sous-fonctions conséquences.

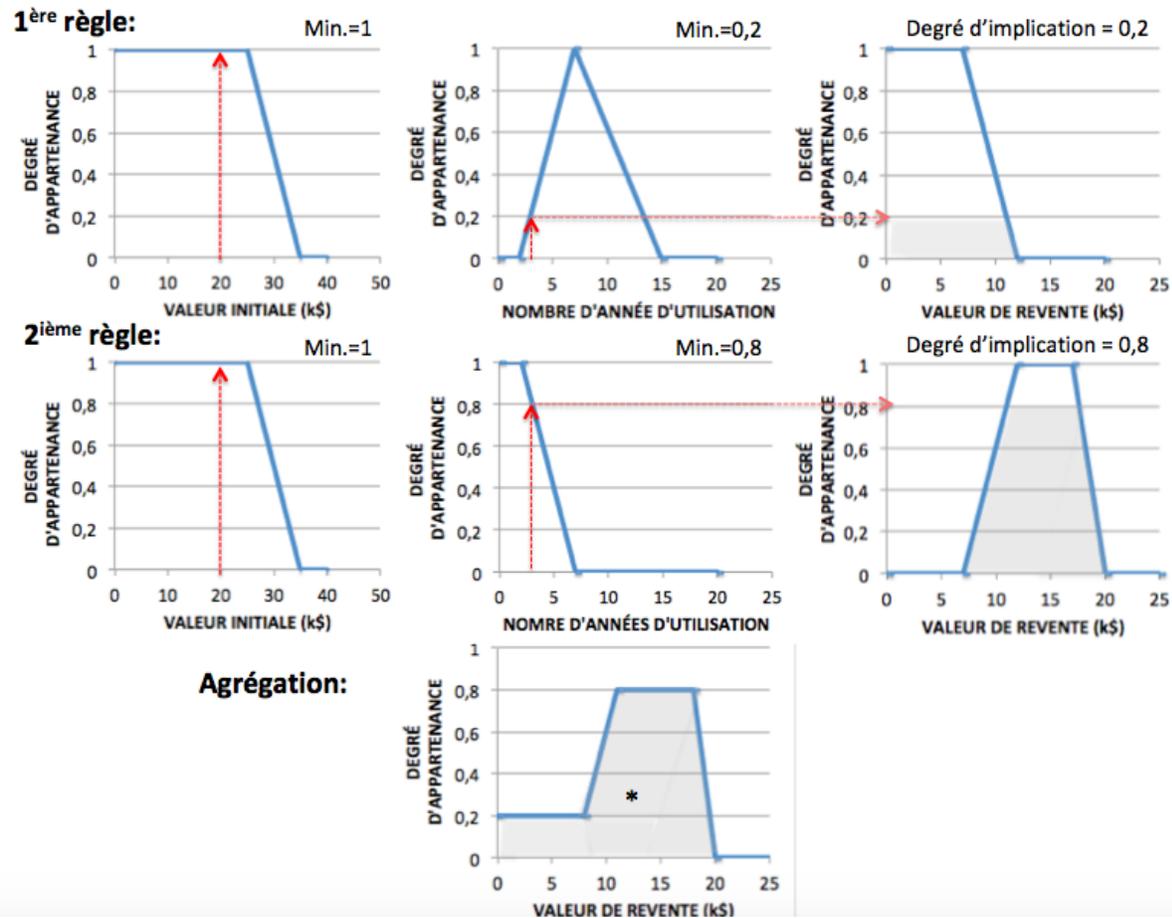


Figure 1-4 : Schématisation des concepts d'agrégation et de la défuzzification par la méthode du centre de gravité (*) relative à l'utilisation de plusieurs règles lorsqu'une ou plusieurs les valeurs entrant dans le modèle se trouvent dans la zone floue.

L'approche « multi-experts » en modélisation peut être appliquée à plusieurs contextes, mais elle est naturellement adaptée à la modélisation d'habitats puisqu'elle permet d'utiliser des connaissances approximatives et des données incertaines ou manquantes dans les bases de données (Cheung *et al.*, 2005; Krueger *et al.*, 2012). La logique floue a la capacité intrinsèque de modéliser les valeurs incertaines en la faisant appartenir proportionnellement à deux catégories en même temps (Mocq, 2013). Dans le contexte de modélisation d'habitat, cette méthode a l'avantage de construire des modèles provenant d'un réseau de connaissances à l'échelle régionale au lieu d'utiliser des données spécifiques à une rivière, ce qui en fait un modèle potentiellement exportable d'une rivière à l'autre. Le travail lié à la codification et à la modélisation de l'avis d'expert est plutôt simple et requiert peu de temps. Il est également possible d'intégrer de

nouveaux experts ou de rectifier des paramètres. Finalement, cette méthode demande potentiellement beaucoup moins de travaux de terrain que l'approche classique, puisque seule la validation nécessite quelques mesures par rivière. Le modèle peut également être validé à partir de données existantes.

1.7 La température de l'eau dans les modèles d'habitats du saumon

La température de l'eau est une variable clé pour la qualité d'habitat des juvéniles et celle-ci est rarement intégrée dans les modèles d'habitat. Elle a été considérée à partir d'approximation de la température de l'air (Caron *et al.*, 1999), mais les avancements concernant cette variable dans les bases de données permettent aujourd'hui d'être beaucoup plus précis. Stanley & Trial (1995) et Wilbur (2012) ont tenté d'intégrer la température de l'eau à des calculs d'IQH afin d'évaluer son effet sur la sélection d'habitats, mais ces modèles n'ont pu être validés. Il existe plusieurs contraintes nuisant à la validation des modèles. Dans le cas de Stanley & Trial (1995) les températures des sections comparées étaient toutes dans l'intervalle optimal pour les tacons et dans la cas de Wilbur (2012) la densité relative n'était pas significativement différente entre les deux sections comparées.

Les modèles d'Ahmadi-Nedushan *et al.* (2008) et de Mocq *et al.* (2013) ont le potentiel de pallier certaines lacunes des modèles classiques, mais n'incluent toujours pas la température de l'eau. Cette lacune au niveau de l'intégration de la thermie et de la présence des refuges dans ces modèles est due, entre autres, à un manque historique au niveau de la quantité et de la qualité de données concernant la température. Les prédictions de la température de l'eau sont la plupart du temps basées sur la température de l'air. Bien que ces deux variables soient généralement bien corrélées (Daigle *et al.*, 2016), plusieurs éléments peuvent être omis. C'est notamment le cas en présence d'un refuge thermique créé par les résurgences d'eau souterraine, par la présence d'affluents plus frais que le cours d'eau principal (Dugdale *et al.*, 2013) ou

encore, dans le cas d'une fosse très profonde thermiquement stratifiée (Frechette *et al.*, 2018).

Au cours des dernières années, plusieurs chercheurs ont travaillé à pallier cette lacune en développant des outils pour caractériser et modéliser la température de l'eau des rivières de l'est du Canada et leurs tributaires (St-Hilaire *et al.*, 2012; Kwak *et al.*, 2016). De surcroît, Boyer *et al.* (2016) ont développé une base de données impressionnante pour la température de l'eau des rivières à saumon pour la même région du pays (Réseau RivTemp, www.rivtemp.ca). Il est possible de croire que ces avancées sont un tremplin sans précédent pour l'amélioration des bases de données de température et donc des modèles d'habitat du saumon.

2 SYNTHÈSE DE LA DÉMARCHE SCIENTIFIQUE

2.1 Méthodologie des activités de recherche

Afin de répondre à l'objectif principal du projet, soit d'intégrer la température de l'eau à un modèle d'habitat du saumon atlantique au stade de tacon, la méthodologie a été scindée en deux volets. Dans un premier temps, des ensembles flous ont été construits avec la collaboration d'experts considérant quatre variables d'habitat. Dans un deuxième temps, l'utilisation de l'habitat par les tacons sur des sites ayant un contraste thermique a été évaluée lors d'une campagne d'échantillonnage. Les données récoltées sur le terrain ont été utilisées pour valider le modèle. Les IQH relatifs aux parcelles échantillonnées ont été calculés et comparés aux densités relatives de tacons retrouvées dans des sections thermiquement contrastées.

2.1.1 Construction des ensembles flous

Variables et catégories

Les trois variables les plus communément utilisées en modélisation d'habitat du saumon sont la profondeur d'eau, la vitesse du courant et la taille du substrat (Yi *et al.*, 2017). Ahmadi-Nedushan *et al.* (2008) et Mocq *et al.* (2013) les ont utilisées pour la construction de leurs modèles flous et ces variables ont été reprises dans ce projet-ci, en plus d'ajouter la température de l'eau.

Chaque variable a été divisée en trois catégories linguistiques de type « faible », « moyen » et « élevé ». Le tableau 2-1 récapitule noms de catégories pour les variables d'entrée et de sortie.

Puisqu'elles sont plus intuitives à utiliser, seules les fonctions linéaires (triangulaires, trapézoïdales et fonctions associées) telles qu'illustrées à la figure 1-2 ont été suggérées aux experts pour la définition des catégories.

Tableau 2-1 : Noms des catégories pour chacune des variables d'entrée et de sortie

	Catégories		
	Faible	Moyenne	Élevée
Variables d'entrée			
<i>Vitesse du courant</i>	lente	moyenne	rapide
<i>Température de l'eau</i>	froide	moyenne	chaude
<i>Profondeur de l'eau</i>	faible	moyenne	profonde
<i>Diamètre du substrat</i>	petit	moyen	grand
Variable de sortie			
<i>IQH</i>	faible	moyen	élevé

Sélection des experts

D'avril à octobre 2017, 22 experts reconnus du saumon atlantique au stade de tacon ont été rencontrés ou contactés par téléphone et via le logiciel SKYPE®. La sélection des experts se basait sur une expérience minimum d'un an, qui pouvait provenir autant de la littérature que de travaux sur le terrain. Parmi ces experts, on compte des universitaires (étudiants gradués, des professeurs), des chargés de projets, des consultants, des techniciens de terrain et des gestionnaires de ressources naturelles. Dans le but d'optimiser le modèle à l'est du Canada et des États-Unis, seuls des experts ayant une expérience nord-américaine avec les tacons ont été questionnés. Sur les 22 répondants, 18 ont rempli le questionnaire seuls, alors que quatre répondants ont préféré le faire en équipe de deux afin de joindre leurs connaissances. Sur les 30 experts interrogés par Mocq *et al.* (2013), 21 avait une expérience nord-américaine et six ont participé de nouveau pour le modèle incluant la température. Les experts consultés pour ce présent projet ont travaillé sur plusieurs rivières dans différentes régions du Québec (Capitale-Nationale, Saguenay, Côte-Nord, Ungava, Bas-Saint-Laurent et Gaspésie) et du Nouveau-Brunswick. L'expérience de ceux-ci n'a pas été quantifiée précisément. La confiance que l'expert avait en ses connaissances était le seul barème.

Définition des systèmes flous par les experts

En collaboration avec A. St-Hilaire, J. Mocq avait rédigé un document descriptif du projet destiné aux experts. Ce document contenait un questionnaire, des directives détaillées et des exemples pour bien répondre. Ce questionnaire, disponible en annexe I, a été adapté pour ajouter la variable de température.

La tâche des experts consistait d'abord à définir, pour le stade tacon, les limites des fonctions d'appartenance (c.-à-d. les limites des catégories) pour les quatre variables d'entrée et la variable de sortie. Le contexte suggéré aux experts pour la définition des catégories était « la qualité de l'habitat du tacon pour sa survie », en été, dans les rivières de l'est du Canada. Tel qu'illustré à la figure 2-1, la réponse hypothétique donnée par un expert concernant la température pouvait être par exemple, que de 0 à 10 °C la température est froide, que de 15 à 20 °C la température est moyenne et qu'à partir de 25 °C la température est chaude.

En plus de catégoriser la température et les variables classiques, les experts ont défini entre 0 et 1, ce qu'est un mauvais, moyen ou un bon habitat. Un habitat ayant une valeur de 0 est considéré comme un habitat de mauvaise qualité alors qu'un habitat de 1 est considéré comme un habitat idéal. Il ne faut pas confondre le degré d'appartenance et l'IQH qui sont tous les deux entre 0 et 1. La définition des limites des fonctions pour l'IQH relève entièrement de la perception et des connaissances de l'expert.

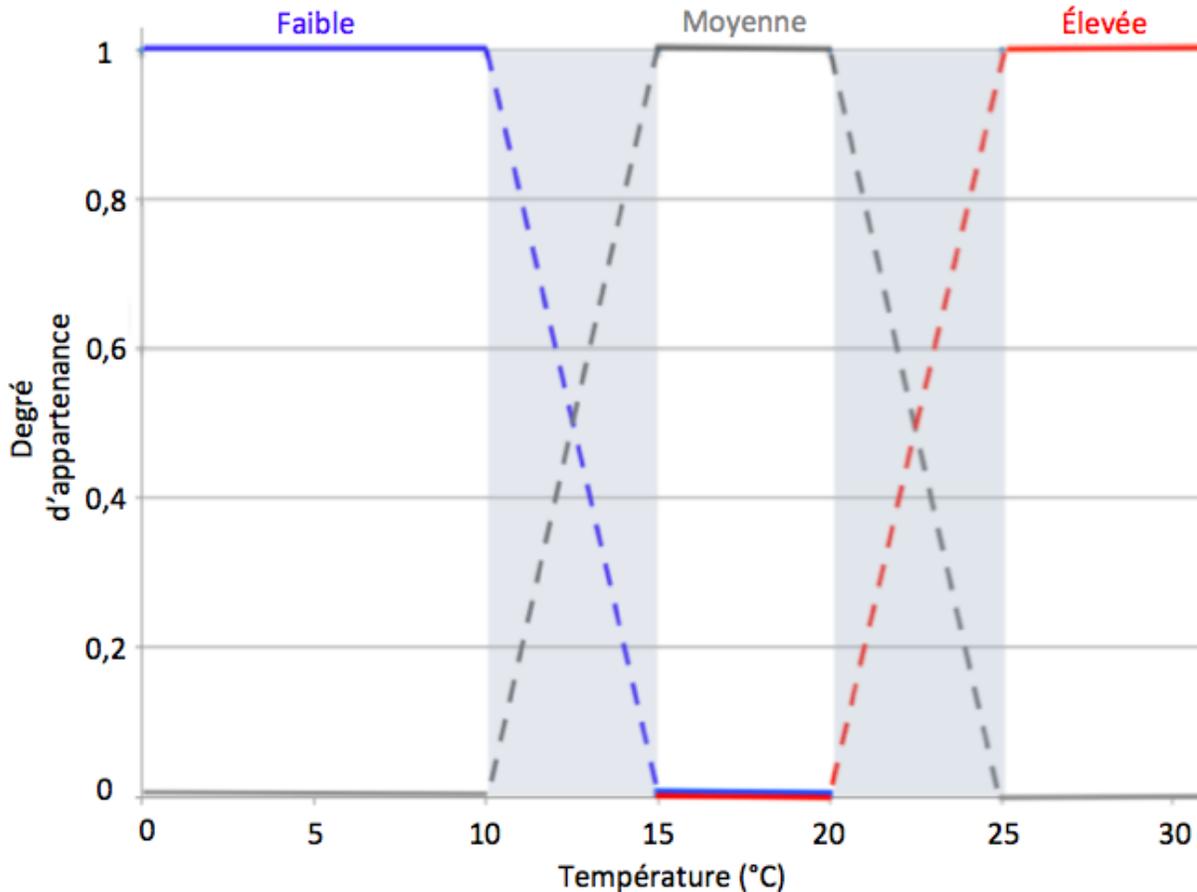


Figure 2-1 : Système flou fictif pour la variable de température

Élicitation des règles floues par les experts

Une fois les systèmes flous construits, toutes les catégories de toutes les variables ont été combinées pour donner 81 règles. Les experts ont attribué une conséquence à ces règles telle la réponse à une question. Une combinaison pouvait prendre la forme suivant: « Si le substrat est petit, ET SI la vitesse est rapide, ET SI la profondeur est grande ET SI la température est moyenne, ALORS l'IQH sera soit élevé, moyen ou pauvre ». Certaines combinaisons peuvent, dans le contexte de l'habitat du tacon, s'avérer rares ou improbables. Par exemple, si un expert a déterminé qu'une **vitesse rapide** était supérieure à 3 m/s et qu'un **petit substrat** était inférieur à 2 mm. Toutes les règles impliquant une vitesse rapide et un petit substrat seraient rarement, voire jamais utilisées puisqu'en réalité, lorsque l'eau s'écoule aussi rapidement elle peut balayer et

emporter un tel substrat. Afin d'avoir un modèle complet, les experts ont tout de même dû imaginer et attribuer une qualité d'habitat à toutes les combinaisons mêmes si elles pouvaient sembler aberrantes.

2.1.2 Validation partielle du modèle

Une campagne de terrain a été entreprise à l'été 2017 permettant de récolter des données de profondeur, vitesse, substrat, température et densité de tacons afin de valider partiellement le modèle. Le terme « validation partielle » fait référence au fait que ce ne sont pas les 81 combinaisons possibles du modèle qui ont été retrouvées sur le terrain durant la campagne d'échantillonnage. Certaines combinaisons sont très rarement retrouvées dans les aires de taconnage du saumon atlantique (ex. profondeur > 2 m). Par ailleurs, la méthode d'échantillonnage par pêche électrique ne permettait, entre autres, qu'un accès à des zones peu profondes de la rivière.

La sélection des sites

Avant tout, le modèle développé dans le cadre de ce projet se voulait « généraliste » et donc exportable sur différentes rivières. Un des objectifs lors de la sélection des sites était de pouvoir valider le modèle sur plus d'une rivière. Durant les dernières années, les équipes d'André St-Hilaire et de Normand Bergeron ont mené plusieurs projets sur des rivières à saumons, dont les aires de taconnage sont désormais bien connues. C'est le cas notamment de trois rivières : la Rivière Sainte-Marguerite, dans la région de Saguenay et des rivières Ouelle et Matapédia dans la région du Bas-Saint-Laurent.

La sélection des sites reposait sur deux critères principaux référant aux hypothèses du projet. Celles-ci supposaient que la température de l'eau était déterminante pour la qualité d'habitat des tacons et que celle-ci influence la sélection d'habitats. Pour isoler l'effet de la température de l'eau, on devait retrouver sur les sites :

- des zones thermiquement contrastées;
- la similitude des autres variables (profondeur, vitesse, substrat) dans les zones.

La figure 2-2 schématise les termes «site», «section chaude», «section froide».

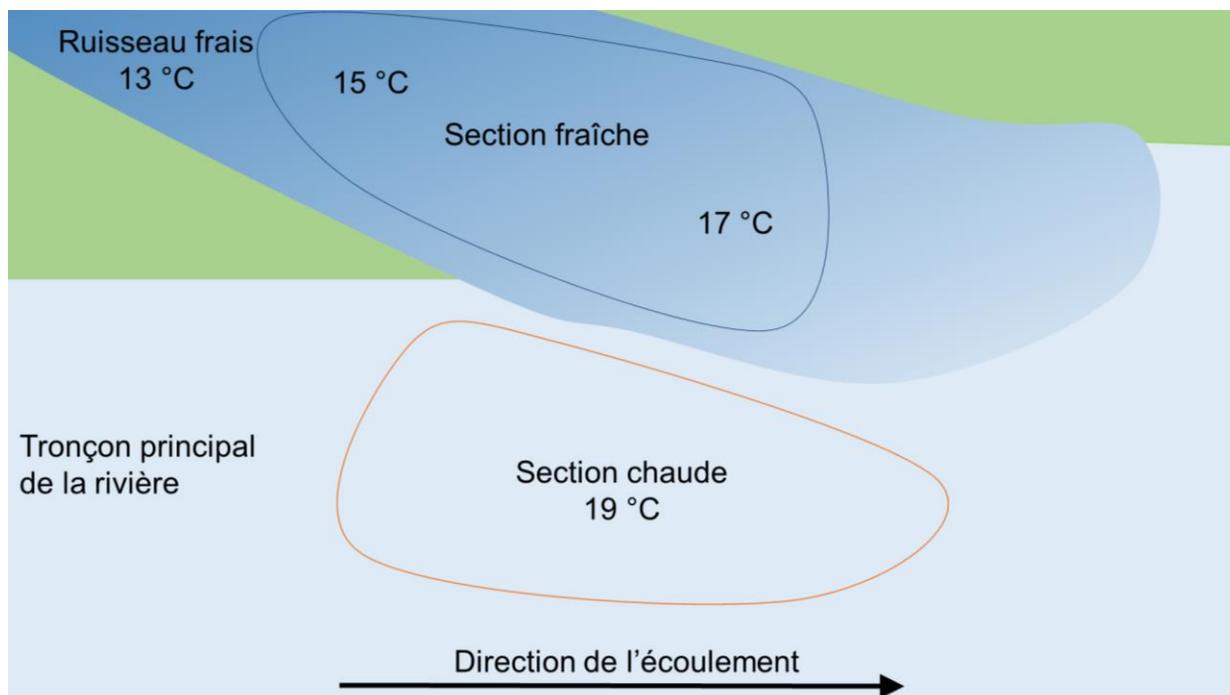


Figure 2-2 : Schématisation des éléments clés d'un site d'échantillonnage. Image inspirée du Magazine Saumon© Volume 41/No 3, Automne 2018 p. 33

À partir de la base de données et des photos thermiques aériennes de Dugdale (2014), des refuges thermiques formés par des tributaires frais ont été présélectionnés. Les contrastes thermiques ont été analysés à l'aide des séries chronologiques disponibles dans la base de données RivTemp (www.rivtemp.ca). Les moyennes quotidiennes de température entre 8:00 et 16:00 ont été comparées entre les tributaires et leurs rivières réceptrices. On s'est intéressé aux sites qui avaient les contrastes les plus élevés.

Les sites présélectionnés ont été visités en juin 2017 avec une caméra thermique pour vérifier que les sections contrastées étaient bien définies (1^{er} critère), c.-à-d. suffisamment grandes ($> 25 \text{ m}^2$) et assez larges ($> 2 \text{ m}$). Sur place, on a vérifié que la profondeur, la taille du substrat et la vitesse était similaire dans les sections à comparer (2^{ème} critère). Une pêche sommaire était également effectuée pour vérifier la présence de tacons (3^{ème} critère).

En regard des critères ci-dessus, sept sites ont été sélectionnés pour effectuer l'échantillonnage. Parmi ces sites, cinq étaient situés sur la rivière Sainte-Marguerite et deux sur le bassin versant de la rivière Matapédia. Toutefois, trois de ces sites, situés sur la rivière Sainte-Marguerite, n'ont pas été retenus pour les analyses puisque lors de l'évènement de pêche, le contraste thermique du refuge était trop faible ($< 1,0 \text{ }^\circ\text{C}$) ou inexistant dû à la variabilité spatio-temporelle des panaches. Aucun site n'a été sélectionné sur la Rivière Ouelle puisqu'aucun tacon n'a été pêché lors de la première visite que le tributaire formant un des refuges thermiques ciblés était presque asséché. Au final, quatre sites ont été compatibles pour l'échantillonnage et l'analyse des résultats.

Les sites A et B étaient situés sur la rivière Sainte-Marguerite. Cette rivière s'étale sur 100 km dans une zone principalement forestière entre Chicoutimi et Sacré-Cœur sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent au Québec. Cette rivière a un bassin versant de $2\,100 \text{ km}^2$ et la population de saumon adulte ayant frayé en 2016 a été d'environ 360 individus (MFFP, 2017). La température de l'air en été pour cette région est approximativement de $21,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Les sites A et B sont situés entre 4,2 km et 42,5 km de l'embouchure de la baie Sainte-Marguerite.

Les sites C et D se trouvent dans le bassin versant de la rivière Matapédia, sur la rive sud du Québec, Canada. La rivière Matapédia mesure 65 km de long et possède un bassin versant de $3\,791 \text{ km}^2$. La température moyenne de l'air durant la période estivale est d'environ 22°C . Environ 1 940 individus adultes ont frayé sur cette rivière en 2016.

Le site C se situait à la confluence de la rivière Matapédia et d'un affluent important (rivière Asmetquagan) à 19,6 km de l'embouchure de la rivière Restigouche. Enfin, le site D se situait à la confluence de la branche Nord de la rivière Humqui avec un petit affluent typiquement plus chaud que le chenal principal (Bras de la Grande cédrière).

Le tableau 3-2 donne plus de détails sur la température moyenne de l'eau en été pour les sites à l'étude. La figure 3-3 localise les sites à l'étude. Les visites aux sites se résumaient à faire des inventaires par pêche électrique et de la caractérisation de l'habitat.

Protocole de pêche et de caractérisation de l'habitat

Ci-après, un « événement de pêche » fera référence à la collecte de données sur un site à une date précise. Aux quatre sites, il y a eu un total de 12 événements de pêche. En arrivant sur un site de pêche, la superficie du panache était délimitée à l'aide du périphérique Seek Thermal Compact XR pour iPhone permettant de visualiser les différences thermiques. La figure 3-4 montre un exemple de photo prise à l'aide de ce dispositif. Ensuite, les températures des sections thermiquement contrastées étaient mesurées plus précisément à l'aide d'un thermomètre à thermocouple Oakton ($\pm 0,1\%$ de la lecture $+0,4$ °C). Pour que le site soit échantillonné, la différence de température entre les deux sections devait être d'au moins 1 °C. La superficie des sections échantillonnées variait entre 50 et 150 m². Si le panache était petit, ou offrait des conditions particulières, introuvables à l'extérieur et près de celui-ci (ex. importante accumulation de substrat fin), il était également possible d'échantillonner directement dans le tributaire si celui-ci était suffisamment large et accessible. Les sections thermiquement contrastées étaient distancées d'un maximum 70 m. En effet, Roy *et al.*, (2012) ont montré qu'un poisson qui effectue des mouvements fréquents dans une zone restreinte (*floaters*) peut voyager environ 70 m (Roy *et al.*, 2012).

Les inventaires de tacons ont été réalisés par pêche électrique (modèle Smith-Root

LR-42). L'équipe de terrain incluait au minimum un pêcheur opérant la pêcheuse électrique ainsi que de deux attrapeurs ayant chacun une prise (filet). Au départ, la pêcheuse électrique était réglée à l'aide de l'option de réglage automatique dans le menu (*quick setting*). L'ajustement automatique du voltage était fait en fonction de plusieurs variables comme la température et la conductivité de l'eau. Cette suggestion est bien souvent « minimaliste ». Donc, 50 volts étaient ajoutés au voltage suggéré. Selon la réaction des poissons au courant électrique durant l'échantillonnage, les paramètres étaient ajustés. La réaction optimale d'un poisson au courant électrique est une nage involontaire vers l'anode entraînée par le courant « en direct » nommée « galvanotaxie » d'une dizaine de secondes. Il y a de multiples facteurs qui influencent la réaction d'un poisson tel que sa distance par rapport à l'anode, la température, etc. Lorsque les poissons semblaient peu affectés par le courant, le voltage était augmenté par incrément de 20 volts et lorsque le poisson prenait plus de 30 secondes pour reprendre sa vigueur, le voltage était diminué par incrément de 15 volts. Si l'ajustement du voltage ne permettait pas d'obtenir un choc sécuritaire pour le poisson, le réglage automatique était fait de nouveau et le « *duty cycle* » était augmenté par incrément de 5 %.

Le pêcheur « balayait » l'anode en faisant des « W » devant les attrapeurs. Les attrapeurs tendaient leur filet à une distance d'environ 0,5 m de l'anode et de façon à anticiper la dérive des poissons déstabilisés par la décharge électrique. Cette opération était répétée de façon à couvrir la surface totale de la section froide dans un premier temps et dans un deuxième temps, de la section chaude. Les sections étaient toujours échantillonnées de l'aval vers l'amont pour éviter de perturber la zone de pêche.

Lorsqu'un tacon était pêché, une **balise numérotée** était déposée pour identifier une parcelle circulaire de 0,5 m de rayon. La température ponctuelle était notée et l'individu était placé dans le contenant correspondant à son lieu de pêche. Les individus qui ne portaient pas de marque de tacon étaient automatiquement remis à l'eau. Les tacons étaient pesés et mesurés sur leur longueur totale et jusqu'à la fourche.

En plus des balises pour marquer la présence des poissons, au minimum, dix **balises de « disponibilité »** étaient déposées dans chaque section de manière « aléatoire stratifiée » afin de cibler toutes les différentes combinaisons de vitesse, profondeur et substrat disponibles. Ces balises étaient déposées lorsqu'aucun tacon n'était pêché ou observé dans un rayon de 0,5 m ($0,79 \text{ m}^2$). À chaque fois qu'une balise de caractérisation était mise à l'eau, la température ponctuelle était notée.

Ce protocole était effectué dans les deux sections thermiquement contrastées. Le temps total de pêche et la superficie étaient notés après avoir échantillonné la section froide et l'équipe effectuait le même temps de pêche sur une surface similaire dans la section chaude. Une fois que les deux sections étaient pêchées, l'équipe retournait à toutes les parcelles balisées pour caractériser l'habitat en présence et en absence de tacons. Les variables d'habitat suivantes ont été mesurées: le diamètre⁵ du substrat dominant, la profondeur de l'eau, la vitesse du courant à 40 % de la hauteur totale de la colonne d'eau (avec un vélocimètre de type Marsh McBirney).

Grille de thermographe

Avec les fluctuations de débit et de température, les panaches évoluent dans le temps et dans l'espace. La surface échantillonnée dans une même section était donc généralement différente d'une fois à l'autre. Afin d'évaluer la variation spatio-temporelle des panaches, nous avons déployé des grilles de thermographes sur deux sites. L'annexe II montre la disposition des thermographes sur les sites A et B. Aux sites C et D, des thermographes ont été installés dans le tributaire et dans le chenal principal afin d'évaluer le contraste thermique.

Analyses des données et validation du modèle

Comme Mocq *et al.* (2013) et Ahmadi-Nedushan *et al.* (2008), l'inférence de Mamdani-Assilian a été utilisée pour calculer le degré d'activation et l'implication (voir section 1.6.2) permettant de trouver la fonction conclusion et procéder à la défuzzification. Le résultat de cette dernière étape est IQH numérique. En utilisant le Toolbox Fuzzy Logic du logiciel Matlab R2016b, l'IQH à chaque parcelle caractérisée en rivière a été déterminé selon le modèle de chaque expert. Puisqu'il y avait 20 modèles d'experts, 20 IQH différents ont été associés à chaque parcelle balisée (0,79 m²). Selon un expert, une parcelle peut générer l'utilisation d'une seule règle floue au

⁵ Mesure de l'axe B c.-à-d. l'axe perpendiculaire à l'axe le plus long.

minimum, lorsque toutes les variables appartiennent à 100 % à une catégorie et un maximum de 16 règles si les quatre variables d'habitat se retrouvent dans la zone floue des fonctions d'appartenance. D'un expert à l'autre, le nombre de règles utilisées pour une parcelle varie. Cela dépend toujours de la délimitation des catégories effectuées par chacun des experts.

La validation principale dans le contexte de ce projet passait par la vérification des hypothèses que la température de l'eau influence l'IQH, tel que défini par un expert, et que la température influence la sélection d'habitats des tacons. Pour bien comprendre l'analyse des données, il faut rappeler quelques points importants :

- l'analyse est réalisée par « évènement de pêche », c'est-à-dire par pêche à un site donné, lors d'une journée donnée (ex. site A, jour 201) ;
- les modèles des 20 experts sont évalués séparément pour chaque évènement de pêche ; l'IQH médian des deux sections thermiquement contrastées est calculé ;
- et la densité de tacons est confrontée aux IQH provenant des deux sections thermiquement contrastées.

Avec un test de Kruskal Wallis, qui compare les groupes selon la médiane, on détermine parmi les 20 modèles d'experts, lesquels détectent une différence significative entre la qualité d'habitat dans la section plus chaude et la section plus froide. Ci-après, les modèles détectant une différence seront évoqués par « experts significatifs ». Si la majorité de ces modèles prédisaient que la section de meilleure qualité était celle où le plus de tacons ont été trouvés, alors le modèle était validé pour cet évènement de pêche. Dans le cas contraire, le modèle était non validé.

Le modèle a aussi été testé sur des données provenant de deux campagnes effectuées entre le 27 juillet et le 16 septembre 2017. Le protocole de pêche était assez similaire à celui décrit ci-haut. Une des campagnes a également été menée sur la rivière Sainte-Marguerite (la même que celle décrite précédemment) et l'autre sur la rivière Petite-Cascapédia. La figure 3-6 montre l'emplacement des sites échantillonnés pour ces campagnes. Cinquante-sept sites échantillonnés, 30 sur la rivière

Petite-Cascapédia et 27 sur la rivière Sainte-Marguerite ont été étudiés pour couvrir l'hétérogénéité de l'habitat du saumon. Chacun de ces sites était distant d'au moins 500 m pour assurer l'indépendance entre les sites. Sur chaque site, 30 parcelles de 4 m² équidistantes sur 5 transects (6 parcelles par transects ; figure 3-6) ont été pêchées à l'électricité (Smith-Root LR24) et caractérisés (température de l'eau, vitesse, profondeur et taille du substrat). La vitesse et la température ont été mesurées à l'aide d'un vélocimètre acoustique (Sontek Flow Tracker 2). Pour cette campagne, le diamètre du substrat médian a été mesuré à défaut d'avoir mesuré le diamètre du substrat dominant. Contrairement à l'autre campagne d'échantillonnage, ces sites d'échantillonnages n'ont pas été sélectionnés *a priori* en fonction d'un contraste thermique. Les mesures effectuées ont été utilisées comme intrants dans le modèle d'experts afin d'obtenir une valeur d'IQH médian. Une régression linéaire entre l'IQH médian et le logarithme de la densité relative des tacons par site a été réalisée pour chaque rivière.

2.2 Résultats

2.2.1 Modèles d'experts

Les 20 experts ont séparé quatre variables d'entrée, soient la température de l'eau, la vitesse, la profondeur et la taille du substrat en trois catégories (faible, moyenne, élevée). Le tableau 3-1 montre les médianes et l'étendue (maximum et minimum) des limites choisies pour construire les ensembles flous. La variabilité (médiane / étendue) est typiquement comprise entre 0,2 et 2 %. Par exemple, pour la température, les experts ont attribué que la catégorie froide est de 0 à 8 °C ± 0,53, de 12 ± 0,86 à 18 °C ± 2,0 pour la catégorie moyenne et de 22 °C ± 2,0 et plus pour la catégorie élevée. La figure 3-1 schématise les paramètres *I*, *II*, *III* et *IV* utilisés au tableau 3-1 pour délimiter les catégories. À noter que l'incertitude sur l'attribution du paramètre *I* est nulle pour les quatre variables d'entrées et la variable de sortie puisque tous les experts ont fait débiter la catégorie faible à 0.

La combinaison de trois catégories pour quatre variables (3⁴) donne un total de 81 règles décrivant des habitats potentiels. Comme déjà mentionné, les 20 experts ont attribué une catégorie d'IQH (faible, moyenne ou élevée) à chaque règle. Un consensus a été obtenu lorsqu'une catégorie d'IQH a été majoritairement choisie comme conséquence d'une règle (Mocq *et al.*, 2013). Les experts ont eu un accord moyen de 63,7 % sur l'ensemble des 81 règles.

Pour 64 % des 81 règles, la conséquence est un « IQH faible » et les experts ont eu un consensus de 68 %. Pour la moitié des règles dont le consensus est un « IQH faible », 11 % des experts ont attribué, inversement, un « IQH élevé ». Pour 25 % des 81 règles, la conséquence est un « IQH moyen » et le consensus moyen a été de 53 %. Pour 9 % des 81 règles, la conséquence est un « IQH élevé » et le consensus a été de 0 56 %. Deux règles n'ont pas de consensus, c'est-à-dire que deux catégories ont été déterminées comme conséquences par un nombre égal d'experts.

2.2.2 Habitats

Considérant tous les événements de pêche, les valeurs médianes pour la vitesse de l'eau ont été de 0,11 à 0,76 m/s, entre 0,11 à 0,38 m pour la profondeur et entre 85 à 190 mm pour la taille du substrat. Malgré les efforts pour échantillonner des sections ayant des valeurs similaires pour ces trois variables, sept sites de pêche n'ont pas permis de remplir cette condition. C'est-à-dire qu'en plus de la température, une ou deux variables ont été significativement différentes entre les deux sections. Le tableau 3-3 donne plus de détails sur les valeurs médianes des variables échantillonnées pour chaque événement de pêche.

Pour tous les événements de pêche complétés, la température de l'eau entre les deux sections comparées a toujours été significativement différente (Test de Kruskal Wallis sur les médianes, $p < 0,05$). Les contrastes thermiques expérimentés entre les sections froides et chaudes ont varié de 1,4 °C à 6,0 °C. Dans les sections froides, les températures mesurées ont été entre 13,1 °C et 19,5 °C (température moyenne dans la

section) et entre 16,1 °C et 21,8 °C dans les sections chaudes. La figure 2-3 schématise le changement spatio-temporel qu'ont subi les panaches des sites A et B pour trois dates différentes dans l'année. Il est possible de constater que le site A a été généralement beaucoup plus contrasté que le site B.

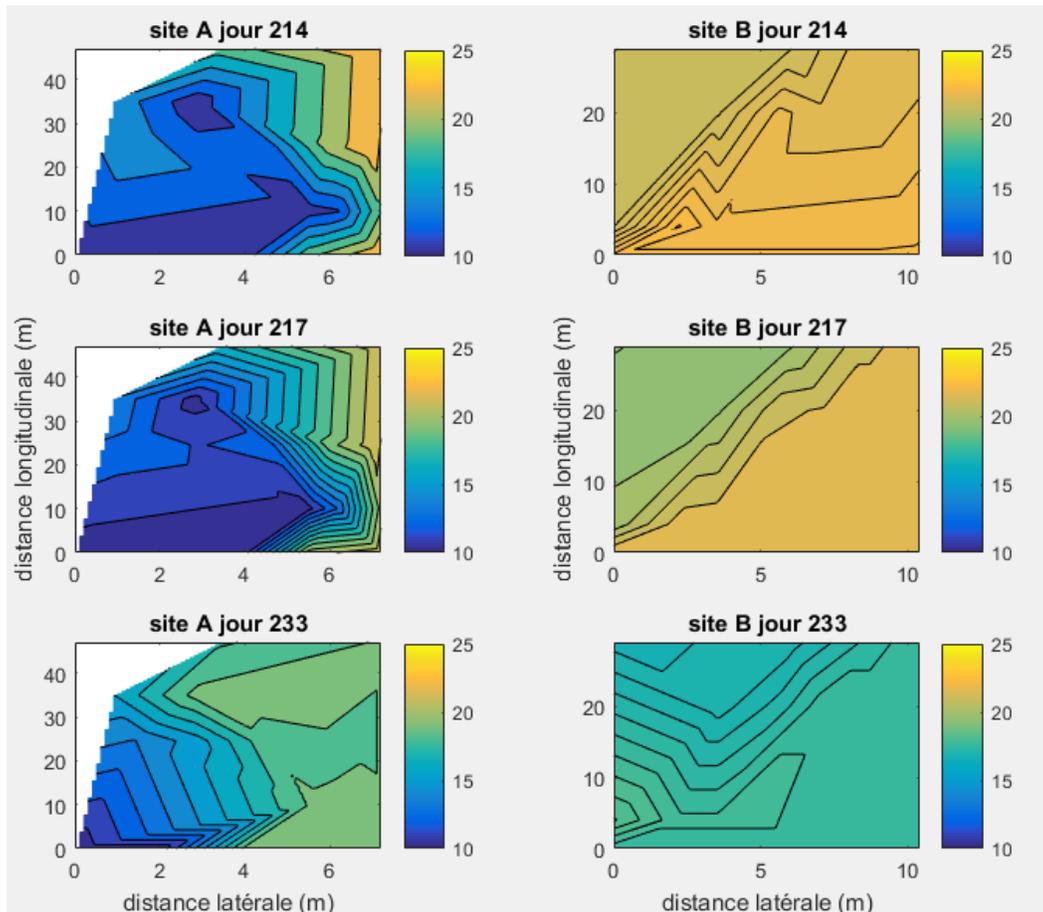


Figure 2-3 : Évolution des panaches d'eau froide pour les sites A et B (rivière Sainte-Marguerite), sur trois journées différentes en 2018. Le croisement de l'abscisse et de l'ordonnée représente la confluence du tributaire et de la rivière principale. L'ordonnée représente la distance vers l'aval.

Les capteurs de température placés sur les sites étudiés ont révélé que la plus chaude température de l'eau pendant la période estivale, tous sites confondus, était de 25,8 °C, ce qui s'approche de la température létale supérieure pour des tacons acclimatés à 10 °C (26,0 °C ; Elliott, 1991). Cependant, lorsque cette température a été atteinte, elle n'a pas duré plus de deux heures. Pour les sites A, B et C, il y a eu respectivement 19,7 et 18 jours où la température a dépassé 22 °C. Cette température

représente un seuil critique supérieur où les fonctions métaboliques normales cessent, mais les tacons peuvent encore survivre pendant plusieurs jours à cette température (Jonsson & Jonsson, 2009). Les dépassements de 22 °C n'ont jamais persisté pendant plus de 12 heures et la nuit, la température diminuait généralement en dessous de 20 °C. Néanmoins, sur le site D, il y a eu 31 jours où la température a été constamment au-dessus de 23 °C et rarement sous 20 °C. Il y a eu une période particulièrement chaude entre le 17 et le 23 juillet (jours 195-207) où la température quotidienne moyenne de l'eau a été supérieure à 22 °C, ce qui est considérablement élevé pour les tacons durant une période prolongée. Même si le site D a été le plus chaud de tous, l'unique événement de pêche électrique effectué sur ce site s'est déroulé pendant une période de la journée où la température des deux sections était inférieure à 18,5 °C.

L'analyse des 451 parcelles a généré 21 031 applications, utilisant 66 des 81 règles. Il y a donc 15 règles qui n'ont jamais été utilisées. Les sept règles les plus utilisées (plus de 1 000 fois) représentaient 63 % des applications et les experts avaient un consensus de 60 %, c'est-à-dire qu'en moyenne 12 experts sur 20 s'entendent pour les conséquences de ces règles (listées dans le tableau 3-4). La règle la plus utilisée (3 798 fois) représentait 18 % des utilisations et les experts s'entendaient à 80 % sur la conséquence de la règle, soit un habitat de qualité élevée. Le reste des experts attribuaient plutôt une qualité d'habitat moyenne à cette combinaison d'intrants.

L'analyse de chacune des parcelles générait 20 IQH différents (20 experts). L'écart-type moyen de ceux-ci est de 0,18. Comme montré par les cases ombragées au tableau 3-5, les modèles des experts 1, 11, 13 et 18 ont détecté une différence significative entre les sections thermiquement contrastées pour plus de 90 % des événements de pêche, alors que les modèles des experts 12, 17 et 19 ont détecté une différence significative seulement pour 10 % des événements de pêche. Pour 50 % des événements, les

experts significatifs⁶ ont été unanimes pour déterminer la section de meilleure qualité, alors que pour 17 % des évènements, le consensus n'a pas été unanime. Par exemple, le jour 269 au site A et le jour 201 au site B (tableau 3-5), 56 % et 57 % des experts significatifs ont convenu que la section froide était de meilleure qualité comparée à 44 % et 43 % qui ont dit le contraire. Pour le reste des évènements de pêche, les experts ont été d'accord à plus de 70 %.

2.2.3 Pêche électrique

Sur les 451 parcelles caractérisées, 226 tacons (1+ et 2+) ont été pêchés ou clairement observés pendant l'été. Le nombre de poissons observés ou capturés dans chaque section a été standardisé pour une surface de 100 m². Comme montré par les étoiles (*) au tableau 3-3, la température des sections où le plus de tacons ont été observés ou capturés, a été entre 15,2 à 20,2 ° C. La section échantillonnée la plus chaude a atteint une température de 21,8 °C, mais aucun tacon n'a été capturé ou observé à cette température. De plus, lorsque les sections chaudes ont dépassé 20,9 °C, 42 % plus de tacons ont été capturés dans la section fraîche. Par ailleurs, lorsque les températures des sections froides ont été inférieures à 15,0 °C, il y a eu 48 % plus de tacons dans la section chaude.

2.2.4 Validation du modèle en présence d'un contraste thermique

Le tableau 3-3 liste les évènements de pêche qui ont permis de valider le modèle à plus de 58 %. Chaque fois que le modèle a été invalidé, la majorité des experts significatifs avait prédit une meilleure qualité de l'habitat dans la section plus froide, tandis que la

⁶ Rappel « experts significatifs »: Avec un test de Kruskal Wallis, qui compare les groupes selon la médiane, on détermine lesquels, parmi les 20 modèles d'experts, détectent une différence significative entre la qualité d'habitat des parcelles dans la section plus chaude et la section plus froide. Ci-après, les modèles détectant une différence seront évoqués par «experts significatifs» (p.50)

plus forte densité relative de tacons a été retrouvée dans la section plus chaude. Tel est le cas du site A pour les jours 214 et 229, le site C pour les jours 201 et 212 ainsi que pour le site D jour 206 (tableau 3-3). Pour le site A, le modèle a été validé trois fois sur cinq. Lorsque le modèle a été invalidé (jours 214 et 229), les températures de la section froide ont été respectivement de 14,2 et 13,1 °C. Pour le jour 214, en plus de la température, la vitesse et la taille du substrat ont été significativement différentes entre les deux sections (vitesse inférieure et substrat plus grand dans la section chaude). Pour le site B, le modèle a toujours été validé. Lors des échantillonnages, les valeurs de température sont demeurées dans un intervalle tolérable par le tacon (15,2 - 20,9 °C). Pour le jour 201, la profondeur a été significativement plus élevée dans la section chaude (0,21 contre 0,33 m) et pour le jour 209, le substrat a été significativement plus grand dans la section froide (100 vs 140 mm). Pour le site C, le modèle a été invalidé pour les deux premiers évènements de pêche. Au jour 206, la température de la section froide a été de 13,9 °C tandis que la température dans la section chaude était de 19,2 °C. La vitesse et le substrat ont été significativement plus élevés dans la section froide. Au jour 212, la température de la zone froide a été de 16,1 °C alors que la température de la section chaude n'a été que de 19,3 °C. La vitesse a également été significativement plus rapide dans la section froide. Le modèle a été validé pour le troisième évènement de pêche sur ce site alors que la température dans la section chaude a été de 21,1 °C et de 16,2 °C dans la section froide. La profondeur a également été significativement plus grande dans la section chaude (0,11 contre 0,17 m) et le substrat a été plus grand dans la section froide (90 contre 105 mm). Enfin pour le site D, le modèle n'a pas été validé pour le seul évènement de pêche considéré. Les températures dans les sections chaudes et froides ont été respectivement de 18,3 °C et 16,5 °C, ces températures sont toutes deux dans la plage tolérable par le tacon.

2.2.5 Validation en fonction de la densité relative par site

Le modèle a été testé avec l'ensemble de données supplémentaires recueillies sur les rivières Sainte-Marguerite et Petite-Cascapédia. La figure 3-7 montre la comparaison entre les transformations logarithmiques de la densité relative des tacons (1+ et 2+)

selon le modèle de Mocq *et al.* (2013) qui considère la profondeur, la vitesse et la taille du substrat (en orange) et selon notre modèle incluant les trois mêmes variables ainsi que la température. Notre modèle explique, respectivement pour les rivières Sainte-Marguerite et Petite-Cascapédia 37 et 15 % de la densité de tacons alors que le modèle de (Mocq *et al.*, 2013) explique respectivement 18 et 1 %.

2.3 Discussion

Dans le cadre du projet présenté dans ce mémoire, 20 professionnels ayant une expérience provenant des rivières de l'Est canadien ont été sélectionnés afin d'optimiser le modèle pour cette région. Le modèle a été validé pour 58 % des événements de pêche. Considérant que ce modèle est le premier modèle flou à inclure la température de l'eau pour les tacons du saumon atlantique et que contrairement à la plupart des études sur l'utilisation des refuges thermiques et les tacons, l'échantillonnage a été effectué durant un été avec des contrastes de température relativement faibles, ce résultat constitue un avancement important. De plus, puisque l'échantillonnage n'a pas été réalisé dans un contexte de température extrême (pas de canicule ou de période chaude prolongée), il a été possible d'observer partiellement les comportements des tacons lorsqu'ils ne sont pas en situation critique. Il a été possible de constater qu'en rivière, les poissons utilisent préférentiellement des sections de rivière entre 15 et 21 °C ce qui correspond aux seuils établis par des études antérieures (tableau 1-1).

La première méthode de validation impliquait de comparer la qualité de l'habitat entre les zones froides et chaudes. Lorsque le modèle n'a pas été validé, il était prédit que l'habitat de meilleure qualité se trouverait dans la zone froide, alors que les tacons ont été capturés en plus grand nombre dans la zone chaude. Il est possible de supposer que la cause principale expliquant l'invalidation du modèle à 42 % des événements de pêche soit que l'été 2017, au Québec, n'a pas été particulièrement chaud. Par conséquent, les refuges d'eau froide dans les rivières échantillonnées n'ont pas toujours été essentiels pour assurer la survie des tacons.

Par ailleurs, il est arrivé à plusieurs reprises durant l'été que des inventaires ont été effectués à des moments où les sections étaient à des températures moyennes incluses entre 15 et 20 °C (ex. site D, jour 206). Ces températures ne sont pas reconnues pour déclencher les mouvements vers des refuges froids chez les juvéniles du saumon atlantique (Breau *et al.*, 2011), ce qui pourrait expliquer certains cas d'invalidation. En

effet, on pourrait penser qu'à ces températures les poissons utilisent indistinctement les deux milieux. Il se pourrait également qu'ils sélectionnent l'habitat en fonction d'autres variables d'habitat physique ou encore en fonction de variables biologiques comme la quantité de proies (Leftwich *et al.*, 1997). Celle-ci peut varier à l'échelle d'une section de rivière en fonction de la végétation qui surplombe les différentes sections.

Comme suggéré par de nombreux auteurs (Kampichler *et al.*, 2000; Mouton *et al.*, 2008; Fukuda, 2009), le modèle proposé a été testé sur deux autres jeux de données confrontant des densités relatives de tacons à des valeurs de vitesse, température, substrat et profondeur. Le modèle à quatre variables, incluant la température, explique mieux la densité relative des tacons que le modèle à trois variables de Mocq *et al.* (2013), et ce, pour chaque site. Ceci suggère que l'ajout d'une variable telle que la température de l'eau améliore les prédictions du modèle.

En dépit de la corrélation positive qui existe entre l'IQH médian incluant la température et la densité relative de tacon pour les données de la rivière Sainte-Marguerite ($R^2 = 0,37$), cette corrélation est moins importante pour celles de la rivière Petite-Cascapédia ($R^2 = 0,15$). Cette faible corrélation pourrait être expliquée par l'homogénéité de l'habitat physique recensée dans cette rivière. En fait, selon notre modèle, le plus faible IQH attribué dans cette rivière était supérieur à 0,4, ce qui est généralement considéré comme un IQH moyen selon la plupart des experts. Ainsi, les parcelles utilisées et inutilisées par les tacons ont toutes été de moyenne ou de bonne qualité, ce qui a pour effet de réduire la relation entre la qualité de l'habitat et l'utilisation d'une parcelle.

Bien que la transférabilité des modèles d'habitat d'une rivière à l'autre ne soit pas soutenue par certaines études (Groshens & Orth, 1993; Leftwich *et al.*, 1997; Strakosh *et al.*, 2003), les corrélations révélées par les régressions linéaires présentées plus haut montrent que les modèles généralistes peuvent être une avenue intéressante en modélisation. En effet, quelques auteurs ont testé la transférabilité de modèle de type

régional. Cependant, la corrélation que nous avons obtenue sur la Sainte-Marguerite, n'a pas été, à notre connaissance, précédemment égalée ($R^2 = 0,02$ à $0,31$; Guay *et al.*, 2003 ; Hedger *et al.*, 2004). Le fait que la corrélation soit considérablement plus élevée pour la rivière Sainte-Marguerite par rapport à la rivière Petite-Cascapédia soulève de nouvelles questions sur l'origine de l'expérience des répondants. En effet, il est possible de constater que l'expertise de nos répondants provient principalement de la rive nord du Fleuve Saint-Laurent (60 %). Il est possible que le modèle soit davantage optimisé pour les rivières plus fraîches, considérant que les adaptations spécifiques des juvéniles du nord et du sud puissent être différentes (Glozier *et al.*, 1997; Hedger *et al.*, 2004).

Même si le modèle proposé est moins parcimonieux que ses prédécesseurs, il s'agit tout de même d'une simplification d'un système complexe influençant la sélection de l'habitat des tacons. La sélection de l'habitat par les tacons repose sur de nombreux facteurs biotiques et abiotiques (Armstrong *et al.*, 2003; Klemetsen *et al.*, 2003). Parmi ces variables on compte par exemple la connectivité de l'habitat (Bardonnet & Baglinière, 2000), la variabilité circadienne et saisonnière, la taille des individus (Wilzbach, 1985; Cunjak, 1996; Mäki-Petäys *et al.*, 2004) et leur âge (voir tableau 3-6), la quantité de proies, la densité de la végétation riveraine et/ou submergée (Milner, 1982; Wilzbach, 1985) la relation de densité dépendance (Jonsson *et al.*, 1998; Lindeman *et al.*, 2015).

Les concepts théoriques d'IQH et d'APU sont ambigus et il est difficile de les lier à la densité relative des poissons (Milhous *et al.*, 1989; Bourgeois *et al.*, 1996). En effet, lorsque l'on exécute l'échantillonnage sur le terrain il est fréquent de supposer qu'un habitat sera bon et de ne trouver aucun poisson. Inversement, il est également possible de trouver des tacons dans des habitats que l'on considérerait, *a priori*, de mauvaise qualité.

L'ajout de nouvelles variables pourrait peut-être permettre de mieux expliquer la présence ou l'absence des tacons dans les différentes sections de rivières. Cependant,

il est important de considérer qu'une variable d'entrée de plus dans un système flou implique une augmentation du nombre de règles ($3^5 = 243$) à répondre pour les experts. Un moyen de réduire le nombre de règles sans nécessairement réduire le nombre de variables pourrait être envisageable. En effet, sachant que la morphologie des différentes sections de rivière telles que les seuils, les rapides et les fosses sont souvent attribuables à des combinaisons de variables (un rapide est généralement peu profond avec une vitesse d'écoulement rapide alors qu'une fosse est profonde avec une vitesse d'écoulement plus lente), il pourrait être intéressant de combiner certaines variables d'entrées afin de réduire le nombre de règles. Ces modifications pourraient être facilement effectuées lors d'une nouvelle consultation avec les experts.

Les connaissances des experts qui ont permis de construire le modèle proposé suggèrent qu'une température plus fraîche offre une meilleure qualité d'habitat, ce qui est probablement plus exact durant les périodes de chaleur intense. Cependant, cela s'avérerait moins exact lorsque les deux sections thermiquement contrastées offrent une gamme de température tolérable pour le tacon, ou encore, lorsque la zone plus froide s'avère thermiquement sous-optimale par rapport à la zone chaude tolérable. En effet, on constate que lorsque la zone chaude était au-dessus de 20,8 °C, le modèle est toujours validé et les tacons ont été principalement capturés dans la zone froide comme prédit par les modèles d'experts. Cette validation systématique pour des températures plus élevées suggère que le modèle est adéquat lorsque les températures limites sont atteintes (Breau *et al.*, 2007; Jonsson & Jonsson, 2009; Elliott & Elliott, 2010). Néanmoins, même si les tacons peuvent survivre à 0 °C et peuvent parfois se nourrir à des températures aussi froides que 3,8 °C (Elliott, 1991), la croissance est largement liée à l'alimentation (Storebakken & Austreng, 1987) et commence à être inférieure à 15 °C (DeCola, 1970). Cela dit, pour quelques événements de pêche, la majorité des experts significatifs ont indiqué que 14,2 °C, 13,1 °C et 13,9 °C offriraient respectivement une meilleure qualité d'habitat que 20,2 °C, 16,1 °C et 19,5 °C. Considérant que ces événements n'ont pas permis de valider le modèle et qu'aucun expert n'a signifié, dans ces situations, que la section plus chaude offrait une meilleure

qualité, il est possible de se questionner sur la définition des paramètres de température établis par nos experts.

Il est reconnu que l'exercice de la pêche électrique à plusieurs reprises sur un même site dans un court intervalle de temps peut influencer la croissance des poissons et indirectement leur survie (Gatz Jr *et al.*, 1986). Cet élément, en plus du taux de mortalité naturel notamment dû à la prédation et la capacité de survie, pourrait expliquer le taux de capture décroissant à un même site au fur et à mesure que la saison avançait à certains sites.

La compréhension du sujet a évolué tout au long de l'avancement du projet. Au moment où les experts ont été rencontrés, les travaux de terrain n'avaient pas encore été réalisés. L'échantillonnage en rivière a permis de mieux saisir le comportement de tacons dans leur habitat naturel alors que les analyses ont permis de mieux comprendre le fonctionnement de la logique floue. Une mise à jour des systèmes flous avec les experts serait pertinente puisqu'une meilleure maîtrise des concepts de la logique floue et une meilleure compréhension des fins du modèle permettraient de mieux expliquer les attentes du projet aux experts et de mieux les guider dans la définition des paramètres des systèmes flous (de Little *et al.*, 2018). Quelques experts ont également témoigné verbalement au cours de l'exercice que l'inclusion d'une quatrième catégorie d'IQH faciliterait probablement l'attribution des conséquences aux règles. Ces catégories pourraient être par exemple : faible, moyenne, élevée et très élevée. Contrairement à l'ajout d'une catégorie aux variables d'entrée, l'ajout d'une catégorie de sortie n'affecte pas le nombre de règles auxquelles les experts doivent répondre. Finalement, il est fort probable qu'en demandant aux experts de définir leurs ensembles et règles flous dans un contexte d'alimentation des tacons plutôt que dans un contexte de survie permettraient de cibler davantage les préférences de ceux-ci.

2.4 Conclusion générale et recommandations

L'objectif principal du projet était d'inclure la température de l'eau dans un modèle d'habitat des tacons. La réalisation de celui-ci a été possible grâce à la collaboration de 20 experts qui ont formaté leurs connaissances sur la qualité des aires de taconnage selon quatre variables associées, soit la température de l'eau, la vitesse du courant, la profondeur et la taille du substrat. Ainsi, pour la première fois un modèle multi-experts de ce type inclut quatre variables d'habitat, dont la thermie qui est largement reconnue comme une variable clé pour la survie des jeunes saumons. De plus, le modèle a été testé sur une rivière de la Côte-Nord et deux rivières de la Gaspésie (Québec, Canada), dans deux différents contextes.

En effet, la pertinence de l'ajout de la thermie a été validée avec plusieurs jeux de données indépendants. Les données de pêche électrique et de caractérisation de l'habitat ont permis de démontrer que le modèle prédit correctement une densité relative supérieure dans les refuges thermiques lorsque le cours d'eau principal a une température supérieure à 21 °C. De plus, deux autres jeux de données récoltés sur des sites sans contraste thermique ont été utilisés pour valider le modèle sans isoler l'effet de la température. Le modèle a permis d'expliquer 37 % des densités relatives de tacons sur une trentaine de sites de la rivière Sainte-Marguerite, présentant des habitats hétérogènes. Dans un même ordre d'idée, le modèle a permis d'expliquer 15 % de l'abondance des tacons sur une section homogène de la rivière Petite-Cascapédia.

La première hypothèse qui a guidé le projet suggérait que la température de l'eau influençait l'IQH, tel que défini par les experts. En moyenne, les experts considèrent qu'à partir de 22 °C, la température est chaude et lorsque la température était chaude, 72 % des experts considèrent que la qualité de l'habitat est faible. En outre, le modèle présenté permet de discriminer la qualité d'habitat de deux sections thermiquement contrastées, ne serait-ce que par quelques degrés de différence, ce qui supporte notre première hypothèse.

La deuxième hypothèse, qui stipulait que la température influence la sélection d'habitats par les tacons, est partiellement validée et appuie des résultats déjà évoqués dans la littérature. En effet, il semble que lorsque les tacons ont le choix et que l'eau du chenal principal dépasse 21 °C, la température devient la variable primordiale pour sélectionner l'habitat de ceux-ci.

En accord avec ce que certains auteurs ont pu noter, les tacons n'utilisent pas les sections les plus froides des rivières, même si la température du chenal principal augmente. En effet, nous avons remarqué que si la température du refuge est sous-optimale pour les tacons (<15 °C), ceux-ci vont préférer rester à des températures plus élevées (>20 °C) et nous supposons, jusqu'à ce que les températures deviennent critiques pour leur survie.

En outre, le modèle présenté semble beaucoup moins performant pour des températures plus fraîches. Selon nos résultats, il a tendance à surestimer la qualité de l'habitat pour des températures aussi froides que 13, 14 ou 15 °C alors que les densités relatives de tacons suggèrent que ces sections sont moins favorisées. L'amélioration de ce modèle nécessiterait une révision par les experts, en portant une attention particulière aux fonctions d'appartenance de la température. Dans le cadre de ce projet, l'attention a été particulièrement mise sur la variable de température, mais le modèle devrait être validé de nouveau sur plusieurs autres rivières afin d'en évaluer la performance pour les autres variables.

Avec un tel modèle, il serait possible d'obtenir des valeurs de qualité d'habitat des tacons pour différents cours d'eau sans nécessairement avoir à l'adapter localement. Ainsi, on réduit considérablement le temps et les coûts investis dans les travaux de terrain associés aux méthodes de modélisation d'habitat classique. Le modèle présenté, couplé à des modèles hydrologiques, thermiques et hydrauliques, pourrait être utilisé lors d'études d'impact en cas de modification sur le régime hydrologique. De plus, ce modèle considère la température à l'échelle d'une section de rivière, ce qui implique

qu'il serait possible de quantifier l'effet d'un refuge thermique sur l'habitat du saumon et ainsi mieux prendre en compte l'importance relative des petits tributaires ayant une température inférieure au tronçon principal. Cet aspect est non négligeable considérant que la gestion des rivières à saumon au Québec est généralement concentrée sur les tronçons principaux et les tributaires majeurs.

Comme constaté dans plusieurs autres études sur les modèles d'habitat, il sera nécessaire de multiplier les efforts de validation afin de démontrer l'efficacité dans un cadre de gestion et de conservation. Même si les modèles basés sur l'avis de multiples experts ont un potentiel de transférabilité élevé il est nécessaire de rassembler des jeux de données relatives à d'autres études sur les tacons habitants des rivières avec des régimes thermique et hydrologique variés afin d'avoir une validation plus complète.

RÉFÉRENCES

- Aas Ø, Klemetsen A, Einum S & Skurdal J (2010) *Atlantic salmon ecology*. John Wiley & Sons,
- Adriaenssens V, De Baets B, Goethals PL & De Pauw N (2004) Fuzzy rule-based models for decision support in ecosystem management. *Science of the Total Environment* 319(1-3):1-12.
- Ahmadi-Nedushan B, St-Hilaire A, Berube M, Ouarda T & Robichaud E (2008) Instream flow determination using a multiple input fuzzy-based rule system: A case study. *River Research and Applications* 24(3):279-292.
- Ahmadi-Nedushan B, St-Hilaire A, Bérubé M, Robichaud É, Thiémonge N & Bobée B (2006) A review of statistical methods for the evaluation of aquatic habitat suitability for instream flow assessment. *River Research and Applications* 22(5):503-523.
- Annear T, Chisholm I, Beecher H, Locke A, Aarrestad P, Burkardt N, Coomer C, Estes C, Hunt J & Jacobson R (2002) *Instream flows for riverine resource stewardship*.
- Armstrong J, Kemp P, Kennedy G, Ladle M & Milner N (2003) Habitat requirements of Atlantic salmon and brown trout in rivers and streams. *Fisheries research* 62(2):143-170.
- Ayllón D, Almodóvar A, Nicola G & Elvira B (2012) The influence of variable habitat suitability criteria on PHABSIM habitat index results. *River Research and Applications* 28(8):1179-1188.
- Baglinière J, Prouzet P, Porcher J, Nihouarn A & Maise G (1987) Caractéristiques générales des populations de saumon atlantique (*Salmo salar* L.) des rivières du Massif armoricain. *La restauration des rivières à saumons, INRA, Paris* :23-37.
- Bardonnet A & Baglinière J-L (2000) Freshwater habitat of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 57(2):497-506.
- Basu N, Todgham A, Ackerman P, Bibeau M, Nakano K, Schulte P & Iwama GK (2002) Heat shock protein genes and their functional significance in fish. *Gene* 295(2):173-183.
- Berman C & Quinn T (1991) Behavioural thermoregulation and homing by spring chinook salmon, *Oncorhynchus tshawytscha* (Walbaum), in the Yakima River. *Journal of Fish Biology* 39(3):301-312.
- Bouchon-Meunier B (2007) *La logique floue: «Que sais-je?» n° 2702*. Presses universitaires de France,

- Boudreau P, Bourgeois G, Leclerc M, Boudreau A & A. B (1996) Two-dimensional habitat model validation based on spatial fish distribution: Application to juvenile Atlantic Salmon on the Moisie river (Quebec, Canada). *2nd international symposium on habitat hydraulics*. (INRS-Eau, Quebec, Canada, p B365-B380).
- Bourgeois G, Cunjak RA, Caissie D & El-Jabi N (1996) A spatial and temporal evaluation of PHABSIM in relation to measured density of juvenile Atlantic salmon in a small stream. *North American Journal of Fisheries Management* 16(1):154-166.
- Bovee KD, Lamb BL, Bartholow JM, Stalnaker CB & Taylor J (1998) Stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology. (DTIC Document).
- Boyer C, St-Hilaire A, Bergeron N, Curry RA, Caissie D & Gillis C-A (2016) Technical Report: RivTemp: A Water Temperature Network for Atlantic salmon rivers in Eastern Canada. *Water News, Canada Water Association Newsletter* (Spring Edition).
- Breau C, Cunjak R & Bremset G (2007) Age-specific aggregation of wild juvenile Atlantic salmon *Salmo salar* at cool water sources during high temperature events. *Journal of Fish Biology* 71(4):1179-1191.
- Breau C, Cunjak RA & Peake SJ (2011) Behaviour during elevated water temperatures: can physiology explain movement of juvenile Atlantic salmon to cool water? *Journal of Animal Ecology* 80(4):844-853.
- Caissie D (2006) The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater Biology* 51(8):1389-1406.
- Caron F, Fontaine P-M & habitats SdlfedpdQDdlfed (1999) *Seuil de conservation et cible de gestion pour les rivières à saumon (Salmo salar) du Québec*. [Québec]: Faune et parcs Québec,
- Caron F & Talbot A (1993) Re-evaluation of habitat classification criteria for juvenile salmon. *Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences* :139-148.
- Cheung WW, Pitcher TJ & Pauly D (2005) A fuzzy logic expert system to estimate intrinsic extinction vulnerabilities of marine fishes to fishing. *Biological conservation* 124(1):97-111.
- Coumou D & Rahmstorf S (2012) A decade of weather extremes. *Nature climate change* 2(7):491.
- Crozier LG, Hendry A, Lawson PW, Quinn T, Mantua N, Battin J, Shaw R & Huey R (2008) Potential responses to climate change in organisms with complex life

- histories: evolution and plasticity in Pacific salmon. *Evolutionary Applications* 1(2):252-270.
- Cunjak R, Roussel J-M, Gray M, Dietrich J, Cartwright D, Munkittrick K & Jardine T (2005) Using stable isotope analysis with telemetry or mark-recapture data to identify fish movement and foraging. *Oecologia* 144(4):636-646.
- Cunjak RA (1996) Winter habitat of selected stream fishes and potential impacts from land-use activity. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 53(S1):267-282.
- Daigle A, Caudron A, Vigier L & Pella H (2016) Optimization methodology for a river temperature monitoring network for the characterization of fish thermal habitat. *Hydrological Sciences Journal* :1-15.
- de Little SC, Casas-Mulet R, Patulny L, Wand J, Miller KA, Fidler F, Stewardson MJ & Webb JA (2018) Minimising biases in expert elicitations to inform environmental management: Case studies from environmental flows in Australia. *Environmental Modelling & Software* 100:146-158.
- DeCola JN (1970) Water quality requirements for Atlantic salmon. (Federal Water Quality Administration, Needham Heights, Mass.(USA). New England Basins Office).
- DeGraaf D & Bain L (1986) Habitat use by and preferences of juvenile Atlantic salmon in two Newfoundland rivers. *Transactions of the American Fisheries Society* 115(5):671-681.
- Deser C, Phillips A, Bourdette V & Teng H (2012) Uncertainty in climate change projections: the role of internal variability. *Climate dynamics* 38(3-4):527-546.
- Dionne M, Caron F, Dodson JJ & Bernatchez L (2008) Landscape genetics and hierarchical genetic structure in Atlantic salmon: the interaction of gene flow and local adaptation. *Molecular Ecology* 17(10):2382-2396.
- Dugdale SJ (2014) *Analyse de la variabilité spatio-temporelle des refuges thermiques à l'échelle du paysage lotique: Importance pour les populations de saumon atlantique (Salmo salar)/Riverscape analysis of the spatio-temporal variability of thermal refuges: Significance for Atlantic salmon (Salmo salar) populations.* (Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique).
- Dugdale SJ, Bergeron NE & St-Hilaire A (2013) Temporal variability of thermal refuges and water temperature patterns in an Atlantic salmon river. *Remote Sensing of Environment* 136:358-373.

- Dugdale SJ, Bergeron NE & St-Hilaire A (2015) Spatial distribution of thermal refuges analysed in relation to riverscape hydromorphology using airborne thermal infrared imagery. *Remote Sensing of Environment* 160:43-55.
- Dumas J & Prouzet P (1994) Repeuplement et pacage marin. *Le Saumon atlantique* :239-254.
- Dutra E, Schär C, Viterbo P & Miranda P (2011) Land-atmosphere coupling associated with snow cover. *Geophysical research letters* 38(15).
- Ebersole JL, Liss WJ & Frissell CA (2003) Cold water patches in warm streams: physicochemical characteristics and the influence of shading. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 39(2):355-368.
- Elliott J (1991) Tolerance and resistance to thermal stress in juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar*. *Freshwater Biology* 25(1):61-70.
- Elliott J & Elliott J (2010) Temperature requirements of Atlantic salmon *Salmo salar*, brown trout *Salmo trutta* and Arctic charr *Salvelinus alpinus*: predicting the effects of climate change. *Journal of fish biology* 77(8):1793-1817.
- Elson P (1969) High temperature and river ascent by Atlantic salmon. *ICES Anadromous and Catadromous Fish Comm., CM* 1000:12.
- Farrell AP, Eliason E, Sandblom E & Clark T (2009) Fish cardiorespiratory physiology in an era of climate change The present review is one of a series of occasional review articles that have been invited by the Editors and will feature the broad range of disciplines and expertise represented in our Editorial Advisory Board. *Canadian Journal of Zoology* 87(10):835-851.
- Fast MD, Hosoya S, Johnson SC & Afonso LO (2008) Cortisol response and immune-related effects of Atlantic salmon (*Salmo salar* Linnaeus) subjected to short-and long-term stress. *Fish & shellfish immunology* 24(2):194-204.
- Fazey I, Fazey JA, Salisbury JG, Lindenmayer DB & Dovers S (2006) The nature and role of experiential knowledge for environmental conservation. *Environmental conservation* 33(1):1-10.
- FOC FaOC (2012) Temperature threshold to define management strategies for Atlantic salmon (*Salmo salar*) fisheries under environmentally stressful conditions. (Canadian Science Advisory Secretaria, Science Advisory Report 2012/2019, Department of Fisheries and Ocean), p 17 p.
- Frechette DM, Dugdale SJ, Dodson JJ & Bergeron NE (2018) Understanding summertime thermal refuge use by adult Atlantic salmon using remote sensing, river temperature monitoring, and acoustic telemetry. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*.

- Fry FEJ (1947) *Effects of the environment on animal activity*. Publications of the Ontario Fisheries Research Laboratory, Toronto
- Fukuda S (2009) Consideration of fuzziness: Is it necessary in modelling fish habitat preference of Japanese medaka (*Oryzias latipes*)? *Ecological Modelling* 220(21):2877-2884.
- Garside E (1973) Ultimate upper lethal temperature of Atlantic salmon *Salmo salar* L. *Canadian Journal of Zoology* 51(8):898-900.
- Gatz Jr AJ, Loar JM & Cada GF (1986) Effects of repeated electroshocking on instantaneous growth of trout. *North American Journal of Fisheries Management* 6(2):176-182.
- Gendron J-F (2013) Physical controls on summer thermal refuges for salmonids in two gravel-cobble salmon rivers with contrasting thermal regimes: the Ouelle and Ste. Marguerite rivers.
- Gibbins C & Acornley R (2000) Salmonid habitat modelling studies and their contribution to the development of an ecologically acceptable release policy for Kielder Reservoir, North-east England. *River Research and Applications* 16(3):203-224.
- Gibson R (1966) Some factors influencing the distributions of brook trout and young Atlantic salmon. *Journal of the Fisheries Board of Canada* 23(12):1977-1980.
- Gibson R (1993) The Atlantic salmon in fresh water: spawning, rearing and production. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 3(1):39-73.
- GIEC Gdeislédc (2014) Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du GIEC. Édit [Sous La Direction De L'équipe De Rédaction Principale RKPELaMGenève, Suisse), p 161 p.
- Glozier NE, Culp JM & Scrimgeour GJ (1997) Transferability of habitat suitability curves for a benthic minnow, *Rhinichthys cataractae*. *Journal of freshwater ecology* 12(3):379-393.
- Graham C & Harrod C (2009) Implications of climate change for the fishes of the British Isles. *Journal of Fish Biology* 74(6):1143-1205.
- Groshens T & Orth D (1993) Transferability of habitat suitability criteria for smallmouth bass, *Micropterus dolomieu*. *Rivers* 4(3):194-212.
- Guay J, Boisclair D, Leclerc M & Lapointe M (2003) Assessment of the transferability of biological habitat models for Atlantic salmon parr (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 60(11):1398-1408.

- Guay J, Boisclair D, Rioux D, Leclerc M, Lapointe M & Legendre P (2000) Development and validation of numerical habitat models for juveniles of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 57(10):2065-2075.
- Gueguen JC & Prouzet P (1994) *Le saumon atlantique: biologie et gestion de la ressource*. Editions Quae,
- Hansen L & Quinn T (1998) The marine phase of the Atlantic salmon (*Salmo salar*) life cycle, with comparisons to Pacific salmon. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 55(S1):104-118.
- Hedger R, Dodson J, Bergeron N & Caron F (2004) Quantifying the effectiveness of regional habitat quality index models for predicting densities of juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Ecology of freshwater fish* 13(4):266-275.
- Heggenes J (1990) Habitat utilization and preferences in juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*) in streams. *River Research and Applications* 5(4):341-354.
- Heggenes J, Bagliniere J & Cunjak R (1999) Spatial niche variability for young Atlantic salmon (*Salmo salar*) and brown trout (*S. trutta*) in heterogeneous streams. *Ecology of Freshwater Fish* 8(1):1-21.
- Heimann M & Reichstein M (2008) Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature* 451(7176):289.
- Heland M & Dumas J (1994) Ecologie et comportement des juvéniles. *Le saumon atlantique* :29-46.
- Iwama GK, Vijayan MM, Forsyth RB & Ackerman PA (1999) Heat shock proteins and physiological stress in fish. *American Zoologist* :901-909.
- Janikow CZ (1998) Fuzzy decision trees: issues and methods. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)* 28(1):1-14.
- Jeong DI, Daigle A & St-Hilaire A (2013) Development of a stochastic water temperature model and projection of future water temperature and extreme events in the Ouelle River basin in Québec, Canada. *River Research and Applications* 29(7):805-821.
- Jonsson B, Forseth T, Jensen A & Næsje T (2001) Thermal performance of juvenile Atlantic Salmon, *Salmo salar* L. *Functional Ecology* 15(6):701-711.
- Jonsson B & Jonsson N (2009) A review of the likely effects of climate change on anadromous Atlantic salmon *Salmo salar* and brown trout *Salmo trutta*, with particular reference to water temperature and flow. *Journal of fish biology* 75(10):2381-2447.

- Jonsson N, Jonsson B & Hansen L (1998) The relative role of density-dependent and density-independent survival in the life cycle of Atlantic salmon *Salmo salar*. *Journal of Animal Ecology* 67(5):751-762.
- Jorde K, Schneider M, Peter A & Zoellner F (2001) Fuzzy based models for the evaluation of fish habitat quality and instream flow assessment. *Proceedings of the 2001 International Symposium on Environmental Hydraulics*. p 27-28.
- Jowett IG & Davey AJ (2007) A comparison of composite habitat suitability indices and generalized additive models of invertebrate abundance and fish presence–habitat availability. *Transactions of the American Fisheries Society* 136(2):428-444.
- Kaleris V (1998) Quantifying the exchange rate between groundwater and small streams. *Journal of Hydraulic Research* 36(6):913-932.
- Kampichler C, Barthel J & Wieland R (2000) Species density of foliage-dwelling spiders in field margins: a simple, fuzzy rule-based model. *Ecological Modelling* 129(1):87-99.
- Keenleyside MH & Yamamoto FT (1962) Territorial behaviour of juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Behaviour* 19(1):139-168.
- Klemetsen A, Amundsen PA, Dempson J, Jonsson B, Jonsson N, O'connell M & Mortensen E (2003) Atlantic salmon *Salmo salar* L., brown trout *Salmo trutta* L. and Arctic charr *Salvelinus alpinus* (L.): a review of aspects of their life histories. *Ecology of freshwater fish* 12(1):1-59.
- Krueger T, Page T, Hubacek K, Smith L & Hiscock K (2012) The role of expert opinion in environmental modelling. *Environmental Modelling & Software* 36:4-18.
- Kunkel K, Bromirski P, Brooks H, Cavaros T, Douglas A, Easterling D, Emanuel K, Groisman PY, Holland G & Knutson T (2008) Observed changes in weather and climate extremes. . in *Weather and Climate Extremes in a Changing Climate: Regions of Focus: North America, Hawaii, Caribbean, and US Pacific Islands. A report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research*, Édité In T.R. Karl, G.M. Meko, D.M. Meko, S. J. Hassol, A.M. Waple & W.L. Murray (Eds.) Washington DC : NOAA National Climatic Data Center), p 35-80.
- Kwak J, St-Hilaire A & Chebana F (2016) A comparative study for water temperature modelling in a small basin, the Fourchue river, Quebec, Canada (Sous presse). *Hydrological Sciences Journal* :10.1080/02626667.02622016.01174334.
- Lackey RT (2003) Pacific Northwest salmon: forecasting their status in 2100. *Reviews in fisheries Science* 11(1):35-88.

- Lamouroux N, Capra H, Pouilly M & Souchon Y (1999) Fish habitat preferences in large streams of southern France. *Freshwater biology* 42(4):673-687.
- Leclerc M, Boudreau P, Bechara J, Belzile L & Villeneuve D (1994) Modélisation de la dynamique de l'habitat des jeunes stades de saumon atlantique (*Salmo salar*) de la rivière Ashuapmushuan (Québec, Canada). *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture* (332):11-32.
- Leclerc M, Boudreau P, Bechara JA & Belzile L (1996) Numerical method for modelling spawning habitat dynamics of landlocked salmon, *Salmo salar*. *Regulated Rivers: Research & Management* 12(2-3):273-285.
- Leftwich KN, Angermeier PL & Dolloff CA (1997) Factors influencing behavior and transferability of habitat models for a benthic stream fish. *Transactions of the American Fisheries Society* 126(5):725-734.
- Lindeman AA, Grant JW & Desjardins CM (2015) Density-dependent territory size and individual growth rate in juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Ecology of Freshwater Fish* 24(1):15-22.
- Lund SG, Caissie D, Cunjak RA, Vijayan MM & Tufts BL (2002) The effects of environmental heat stress on heat-shock mRNA and protein expression in Miramichi Atlantic salmon (*Salmo salar*) parr. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 59(9):1553-1562.
- Mäki-Petäys A, Erkinaro J, Niemelä E, Huusko A & Muotka T (2004) Spatial distribution of juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*) in a subarctic river: size-specific changes in a strongly seasonal environment. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 61(12):2329-2338.
- McCormick SD, Hansen LP, Quinn TP & Saunders RL (1998) Movement, migration, and smolting of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 55(S1):77-92.
- McDonald D, McFarlane W & Milligan C (1998) Anaerobic capacity and swim performance of juvenile salmonids. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 55(5):1198-1207.
- MFFP Mdf, de la faune et des parcs (2017) Bilan de l'exploitation du saumon au Québec en 2016.), p 299 p.
- MFFP MdFdIFedP (2016) Plan de gestion du saumon atlantique 2016-2016. Édité Parcs MDFDLFED, Habitats DGDLESLFES & Aquatique DDLFQuébec), p 40 p.
- Milhous RT, Updike MA & Schneider DM (1989) Physical habitat simulation system reference manual: version II. (US Fish and Wildlife Service).

- Millidine K, Malcolm I & Fryer R (2016) Assessing the transferability of hydraulic habitat models for juvenile Atlantic salmon. *Ecological indicators* 69:434-445.
- Milner N (1982) Habitat evaluation in salmonid streams. *Proceeding of the 13th Annual Study course. West Bridgford: Institute of Fisheries Management* :47-65.
- Milner N & Wyatt R (1991) HABSCORE software manual. *NRA Report (Welsh)*.
- Milner N, Wyatt R, Barnard S & Scott M (1995) Variance structuring in stream salmonid populations, effects of geographical scale and implications for habitat models. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture* (337-9):387-398.
- Mocq J (2013) *Modélisation floue de l'habitat du saumon atlantique Salmo salar*. (Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique).
- Mocq J, St-Hilaire A & Cunjak R (2015) Influences of experts' personal experiences in fuzzy logic modeling of Atlantic salmon habitat. *North American Journal of Fisheries Management* 35(2):271-280.
- Mocq J, St-Hilaire A & Cunjak RA (2013) Assessment of Atlantic salmon (*Salmo salar*) habitat quality and its uncertainty using a multiple-expert fuzzy model applied to the Romaine River (Canada). *Ecological modelling* 265:14-25.
- Monk WA, Wilbur NM, Curry RA, Gagnon R & Faux RN (2013) Linking landscape variables to cold water refugia in rivers. *Journal of environmental management* 118:170-176.
- Morantz D, Sweeney R, Shirvell C & Longard D (1987) Selection of microhabitat in summer by juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 44(1):120-129.
- Morice CP, Kennedy JJ, Rayner NA & Jones PD (2012) Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 data set. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 117(D8).
- Mouton AM, Schneider M, Peter A, Holzer G, Müller R, Goethals PL & De Pauw N (2008) Optimisation of a fuzzy physical habitat model for spawning European grayling (*Thymallus thymallus* L.) in the Aare river (Thun, Switzerland). *ecological modelling* 215(1-3):122-132.
- Noakes DJ, Beamish RJ & Kent ML (2000) On the decline of Pacific salmon and speculative links to salmon farming in British Columbia. *Aquaculture* 183(3-4):363-386.
- Olsvik PA, Vikeså V, Lie KK & Hevrøy EM (2013) Transcriptional responses to temperature and low oxygen stress in Atlantic salmon studied with next-generation sequencing technology. *BMC genomics* 14(1):817.

- Parasiewicz P & Dunbar M (2001) Physical habitat modelling for fish—. *Arch. Hydrobiol. Suppl* 1352(4):239-268.
- Parsell D & Lindquist S (1993) The function of heat-shock proteins in stress tolerance: degradation and reactivation of damaged proteins. *Annual review of genetics* 27(1):437-496.
- Perkins S, Alexander L & Nairn J (2012) Increasing frequency, intensity and duration of observed global heatwaves and warm spells. *Geophysical Research Letters* 39(20).
- Pickering A & Pottinger T (1985) Cortisol can increase the susceptibility of brown trout, *Salmo trutta* L., to disease without reducing the white blood cell count. *Journal of fish biology* 27(5):611-619.
- Pinfold G & Federation AS (2011) Economic value of wild Atlantic salmon. *Atlantic Salmon Federation*.
- Pörtner HO & Farrell AP (2008) Physiology and climate change. *Science* 322(5902):690-692.
- Prost O, Le Coarer Y, Lamouroux N & Capra H (2014) Vers une nouvelle génération de modèles d'habitats numériques. (isrstea, Unités de recherche HYAX-MALY).
- Quigley JT & Hinch SG (2006) Effects of rapid experimental temperature increases on acute physiological stress and behaviour of stream dwelling juvenile chinook salmon. *Journal of Thermal Biology* 31(5):429-441.
- Rimmer D, Paim U & Saunders R (1983) Autumnal habitat shift of juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*) in a small river. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 40(6):671-680.
- Roy ML, Roy AG, Grant JW & Bergeron NE (2012) Individual variability in the movement behaviour of juvenile Atlantic salmon. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 70(2):339-347.
- Sabaton C (2003) Méthode des microhabitats dans les cours d'eau—Approche IFIM et ESTIMHAB. *Chatou, EDF*.
- Salski A (1999) Fuzzy logic approach to data analysis and ecological modelling. *Proceedings of the European symposium on intelligent techniques (ESIT'99)*.
- Scruton D & Gibson R (1993) The development of habitat suitability curves for juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*) in riverine habitat in insular Newfoundland, Canada. *Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences* :149-161.

- Sousa P, Trigo R, Aizpurua P, Nieto R, Gimeno L & Garcia-Herrera R (2011) Trends and extremes of drought indices throughout the 20th century in the Mediterranean. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11(1):33-51.
- St-Hilaire A, Ouarda TB, Bargaoui Z, Daigle A & Bilodeau L (2012) Daily river water temperature forecast model with ak-nearest neighbour approach. *Hydrological Processes* 26(9):1302-1310.
- Stanley JG & Danie DS (1983) Species Profiles. Life Histories and Environmental Requirements of Coastal Fishes and Invertebrates (North Atlantic). WHITE PERCH. (MAINE COOPERATIVE FISHERY RESEARCH UNIT ORONO).
- Stanley JG & Trial JG (1995) Habitat Suitability Index Models: Nonmigratory Freshwater Life Stages of Atlantic Salmon. (NATIONAL BIOLOGICAL SERVICE ANN ARBOR MI GREAT LAKES SCIENCE CENTER).
- Steinhausen M, Sandblom E, Eliason E, Verhille C & Farrell A (2008) The effect of acute temperature increases on the cardiorespiratory performance of resting and swimming sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*). *Journal of Experimental Biology* 211(24):3915-3926.
- Storebakken T & Austreng E (1987) Ration level for salmonids: I. Growth, survival, body composition, and feed conversion in Atlantic salmon fry and fingerlings. *Aquaculture* 60(3-4):189-206.
- Stradmeyer L & Thorpe J (1987) Feeding behaviour of wild Atlantic salmon, *Salmo salar* L., parr in mid-to late summer in a Scottish river. *Aquaculture Research* 18(1):33-49.
- Strakosh T, Neumann R & Jacobson R (2003) Development and assessment of habitat suitability criteria for adult brown trout in southern New England rivers. *Ecology of Freshwater Fish* 12(4):265-274.
- Symons P & Heland M (1978) Stream habitats and behavioral interactions of underyearling and yearling Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Journal of the Fisheries Board of Canada* 35(2):175-183.
- Taylor EB (1991) A review of local adaptation in Salmonidac, with particular reference to Pacific and Atlantic salmon. *Aquaculture* 98(1-3):185-207.
- Trzcinski MK, Gibson AJF, Amiro PG, Randall RG & Burlington O (2004) Inner Bay of Fundy Atlantic salmon (*Salmo salar*) critical habitat case study. *Science* 2:4A2.
- Von Altrock C (1996) *Fuzzy logic and neurofuzzy applications in business and finance*. Prentice-Hall, Inc.,
- Waddle T & US Geological Survey (2001) PHABSIM for Windows- User's manual and exercises. Édit Usgs-Utdi).

- Wilbur N (2012) *Characterizing thermal refugia for brook trout (Salvelinus fontinalis) and Atlantic salmon (Salmo salar) in the Cains River, New Brunswick, Canada*. Master (University of New Brunswick, New Brunswick). p. 48 p
- Willmer P, Stone G & Johnston I (2009) *Environmental physiology of animals*. John Wiley & Sons,
- Wilzbach MA (1985) Relative roles of food abundance and cover in determining the habitat distribution of stream-dwelling cutthroat trout (*Salmo clarki*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 42(10):1668-1672.
- Yao W, Liu H, Chen Y, Zhang W, Zhong Y, Fan H, Li L & Bamak S (2017) Simulating Spawning and Juvenile Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) Habitat in Colorado River Based on High-Flow Effects. *Water* 9(150).
- Yi Y, Cheng X, Yang Z, Wieprecht S, Zhang S & Wu Y (2017) Evaluating the ecological influence of hydraulic projects: A review of aquatic habitat suitability models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68:748-762.
- Zadeh LA (1965) Information and control. *Fuzzy sets* 8(3):338-353.

3 ARTICLE

INCLUSION DE LA TEMPÉRATURE DE L'EAU DANS UN MODÈLE D'HABITAT FLOUE POUR LES SAUMONS ATLANTIQUES JUVÉNILES

Le titre original de cette publication est : " Inclusion of water temperature in a fuzzy logic Atlantic salmon parr habitat model. "

J. Beaupré^a †, J. Boudreault^a, N.E. Bergeron^a and A. ST-HILAIRE^{a, b}

^a INRS-ETE, Université du Québec, 490 rue de la Couronne, Québec, QC, G1K9A9, Canada.

^b Canadian River Institute, Department of Biology, University of New-Brunswick, P.O. Box 4400, Fredericton, NB, Canada, E3B5A3

En vue d'être soumis à Ecological Modelling

Le professeur St-Hilaire a contribué au soutien mathématique entourant la logique floue. Il a structuré la démarche statistique et scientifique permettant d'intégrer la température au modèle et à le valider. Son réseau de contacts a permis l'entretien avec de nouveaux et d'anciens experts. Monsieur Boudreault a fourni des jeux de données supplémentaires et il a participé à leur récolte, permettant une validation supplémentaire du modèle. Il a également contribué aux analyses statistiques de cette validation ainsi qu'à la rédaction du protocole et des résultats. Le professeur Bergeron a soutenu le projet par son expertise sur le saumon atlantique et a guidé l'élaboration du protocole de terrain pour la validation du modèle. Finalement, l'auteure principale a coordonné les rencontres avec les experts, intégré les paramètres du modèle à partir des codes Matlab élaborés par Julien Mocq, organisé les sorties de terrain, performé la majorité des analyses et élaboré la structure du manuscrit, qu'elle a écrit en très grande partie.

Le produit final est le fruit d'un travail d'équipe hors-pair, de nombreuses discussions et relectures.

Résumé

La température de l'eau étant une variable susceptible d'augmenter dans les prochaines décennies et cette hausse étant clairement identifiée comme une menace pour les espèces de poissons d'eau froide, il est nécessaire d'adapter et d'optimiser les outils permettant d'évaluer la quantité et la qualité des habitats. Ce projet de recherche présente les étapes qui ont mené à l'amélioration d'un modèle de qualité de l'habitat pour les tacons du saumon atlantique. L'amélioration consistait à ajouter la température de l'eau dans un modèle d'habitat à logique floue en tant que déterminant clé de la qualité de l'habitat des juvéniles. Le projet comportait deux étapes principales. D'abord, la consultation d'experts en saumon pour recueillir leurs connaissances sur l'habitat du tacon, puis la validation du modèle avec des données recueillies sur les rivières Sainte-Marguerite, Matapédia et Petite-Cascapédia. Dans un contexte de contraste thermique, le modèle confirme qu'une température fraîche offrirait une meilleure qualité d'habitat. Cependant, les résultats de l'enquête de terrain indiquent que lorsqu'ils ont le choix, le tacon semble utiliser moins la zone particulièrement froide ($<15\text{ }^{\circ}\text{C}$) et les zones chaudes ($>20,5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ainsi, le modèle a été validé pour moins de 60 % des enquêtes, car de tels contrastes thermiques n'ont pas été mesurés régulièrement sur le terrain. Néanmoins, il existe une corrélation significative entre l'indice de qualité de l'habitat médian et la densité de tacons par site pour la rivière Sainte-Marguerite ($R^2 = 0,38$). Une relation moins importante, quoique significative, est observée pour la rivière Petite-Cascapédia ($R^2 = 0,14$). Cependant, dans tous les cas, notre modèle à quatre variables (profondeur, vitesse, taille du substrat et température) explique davantage la densité relative des tacons qu'un modèle similaire incluant seulement trois variables, excluant la température.

Abstract

As water temperature is projected to increase in the next decades and its rise is clearly identified as a threat for cold water fish species, it is necessary to adapt and optimize the tools allowing us to assess the quantity and quality of habitats with the inclusion of temperature. In this paper, an existing fuzzy logic habitat model was improved by adding water temperature as a key determinant of juvenile Atlantic salmon parr habitat quality. First, salmon experts were consulted to gather their knowledge of salmon parr habitat, then the model was validated with juvenile salmon electrofishing data collected on the Sainte-Marguerite, Matapedia and Petite-Cascapedia rivers (Québec, Canada). The resulting model, elaborated from expert knowledge, demonstrate in a context of thermal contrast at a site, cooler temperature offered better quality of habitat. Our field data indicates that when offered the choice, salmon parr significantly preferred to avoid both cold areas ($<15^{\circ}\text{C}$) and warm areas (> 20.5). Because such thermal contrasts were not consistently present among the sites sampled, the model was only validated for less than 60% of the sites. The results nevertheless indicate a significant correlation between median Habitat Quality Index and parr density for the Sainte-Marguerite River ($R^2 = 0.38$). A less important, albeit significant (F-test; $p=0.036$) relationship was observed for the Petite-Cascapedia river ($R^2 = 0.14$). In all instances, the four-variable (depth, velocity, substrate size and temperature) model provided a better explanation of parr relative density than a similar model excluding water temperature.

Keywords: Fuzzy logic; Habitat quality model; Atlantic salmon; parrs; water temperature

3.1 Introduction

Anticipated water temperature increase in rivers linked to climatic and anthropic changes is a threat to aquatic ecosystems (Isaak *et al.*, 2018). In the recent past summers, water temperature in many Eastern Canadian rivers exceeded critical thermal thresholds for many cold water fish species, such as Atlantic salmon (*Salmo salar*) (i.e. >27.8°C; Gendron, 2013; Jeong *et al.*, 2013). Even if Atlantic salmon is commonly recognized as a relatively thermally tolerant species (Garside, 1973; Jonsson & Jonsson, 2009), it is admitted that juvenile salmon parr become thermally stressed when water temperature exceeds 23°C (Elliott, 1991; Breau *et al.*, 2011). A continuous exposure to extreme temperatures can cause massive mortalities or alter considerably the general conditions of ectotherm fishes (Garside, 1973; McCullough, 1999). Despite the limited predictions about temperature metrics in North American rivers, a general increase of river temperature is suggested and the magnitude of the increase will depend on latitudinal position (Morrill *et al.*, 2005; van Vliet *et al.*, 2013).

In this context, habitat models are key tools to optimize management and conservation programs. In habitat modelling, classical approaches determine the quantity and quality of area potentially useful for a species' life stage or guild based either on expert knowledge or on observed habitat use and physical data (Yi *et al.*, 2017). Classical variables used in habitat model for juvenile Atlantic salmon include flow velocity, water depth and substrate size. When the model is based on habitat use solely (i.e. not taking into account habitat availability), univariate Habitat Suitability Indices (HSI) are defined by field measurements of presence-absence or abundance of fish in sampling parcels. A composite HSI is calculated by combining the univariate HSI. Univariate HSI can be combined using different methods (additive function, arithmetic mean, lowest HSI, etc.) but the most commonly used in the past has been the geometric mean. A HSI of 0 describes a poor habitat, while a HSI of 1 describes an optimal habitat. Multiplying the composite HSI by the surface area on which it applies provides a Weighted Usable Area (WUA). This approach is often used in combination with hydraulic models to provide

estimates of usable areas at difference river discharges (e.g. Instream Flow Incremental Methodology; Bovee *et al.*, 1998; DeGraaf & Bain, 1986; Morantz *et al.*, 1987).

Combining univariate HIs usually rely on two assumptions. First, that habitat variables are independent, and second, that they exert an equal influence on habitat selection (Ahmadi-Nedushan *et al.*, 2008). However, those assumptions cannot be validated in most cases, as some habitat variables (e.g. depth and velocity) are clearly interdependent, and some variables are more important than other in the habitat selection decision. Furthermore, classical methods based on field data typically require large amounts of data that are costly to acquire. They are also generally obtained from a relatively small area (e.g. a single river or catchment), which makes the model poorly transferable to rivers other than the one which served for calibration (Guay *et al.*, 2003; Millidine *et al.*, 2016)

To overcome these gaps, Ahmadi-Nedushan *et al.* (2008) and Mocq *et al.* (2013) worked with fuzzy systems inspired by the work of Jorde *et al.* (2001) who developed the Computer Aided Simulation Model for Instream Flow Requirements (CASIMIR) habitat model. Those authors developed salmonids fuzzy habitat models considering the classical habitat variables of water depth, flow velocity and substrate size. Ahmadi-Nedushan *et al.* (2008) tested the models available for two Atlantic salmon life stages - spawning adults and parr - and conducted a sensitivity analysis of the fuzzy rules of the system based on six expert opinions. Their suggestion was to further validate the model, increase the number of experts and add other habitat variables. Mocq *et al.* (2013) improved the model by adding a life stage (young of the year) and a considerable amount of experts (30 experts in total) with European and North American experience. The authors partially validated their model and compared the output to a classical habitat model (Bourgeois *et al.*, 1996; Gibbins & Acornley, 2000; Ayllón *et al.*, 2012) based on Weighted Usable Areas. Both models were used to assess the variation of WUA as a function of discharge and uncertainty around the relations were estimated using a bootstrap method. The results indicated that relations of WUA as a function of discharge

were similar on both instances, even though the fussy model was based on expert knowledge only. Mocq *et al.* (2015) also showed that the geographical origin of the experts influenced the uncertainty associated to the delimitation of the categories and they hypothesized that experts from different countries were mostly drawing their knowledge from their experience from local rivers. The fuzzy logic approach also offers other advantages: 1) it helps describe imprecise processes through qualitative knowledge and human interpretation, 2) it is unimpaired by dependence between variables, and 3) it allows the easy addition of new predictors or expert knowledge to the model.

Beyond the shortcomings of classical habitat models that could be addressed by fuzzy logic, there are other deficiencies in current Atlantic salmon habitat models. One such deficiency is that models generally neglect water temperature despite its importance for the physiology and phenology of the salmon. Indeed, water temperature has rarely been included in habitat models of this species (except see Stanley & Trial., 1995) and when it was included, it was through approximation from air temperature (Caron *et al.*, 1999). Although this deficiency was probably due to the lack of suitable water temperature data, there are now monitoring networks of river temperature existing in the Pacific Northwest and in Eastern Canada (RivTemp, www.rivtemp.ca; Boyer *et al.*, 2016) which offer the opportunity to improve salmon habitat models by adding water temperature.

The aim of this paper is to improve Atlantic salmon parr habitat modelling in Eastern Canada using a fuzzy logic approach. First, a multi-expert model that includes water temperature is developed to infer juvenile salmon parr habitat quality. The model is then partially validated by comparing values of habitat suitability obtained from the model with parr density data collected in thermally contrasted river reaches.

3.2 Methodology

3.2.1 Multi-experts model

Fuzzy sets and rules

In the context of juveniles salmon habitat modelling, fuzzy logic is used to codify experts' knowledge regarding the role of flow velocity, water depth, substrate size and water temperature salmon parr habitat quality.

The first step in designing a fuzzy model is called “fuzzification”. The purpose of this step is to divide each input variable into categories. In this case, input and output variables were classified as “low”, “medium” or “high”. As an example, flow velocity was categorized as either “slow”, “medium” or “fast”. The fuzzification was completed by interviewing experts on the selected habitat variables and their impact on the suitability of parr habitat. The experts were asked to divide the range of possible values of each variable into three categories using more or less precise ranges of values. The separation of variables into categories is done by assigning a membership degree to the values, thereby creating a membership function (Figure 3.1). A habitat variable (e.g. velocity) value with a membership degree of 0 means that it does not belong to the category. Conversely, a membership degree of 1 means that this habitat variable value belongs totally to the category. For each variable, the experts targeted ranges of values for which they were certain of full membership (i.e., membership degree =1) in the categories.

As working with nominal categories leads to uncertainties, the experts were given the opportunity to leave a range of values that can belong to two categories, thereby representing the uncertainty (or fuzziness) of the expert on the definition of boundaries between categories (e.g. for velocity, 0.3-0.5 m/s; 0.7-0.9 m/s; Figure 3-1). The uncertain intervals are called the “fuzzy zones”. It is possible to model a value in a fuzzy zone by attributing it proportionally to two categories at the same time. To help the expert delineate the categories, we asked them to think about parr habitat in a context of

survival. We did not predetermine upper boundary values for the variables. The experts had to fix the boundaries themselves according to their experience.

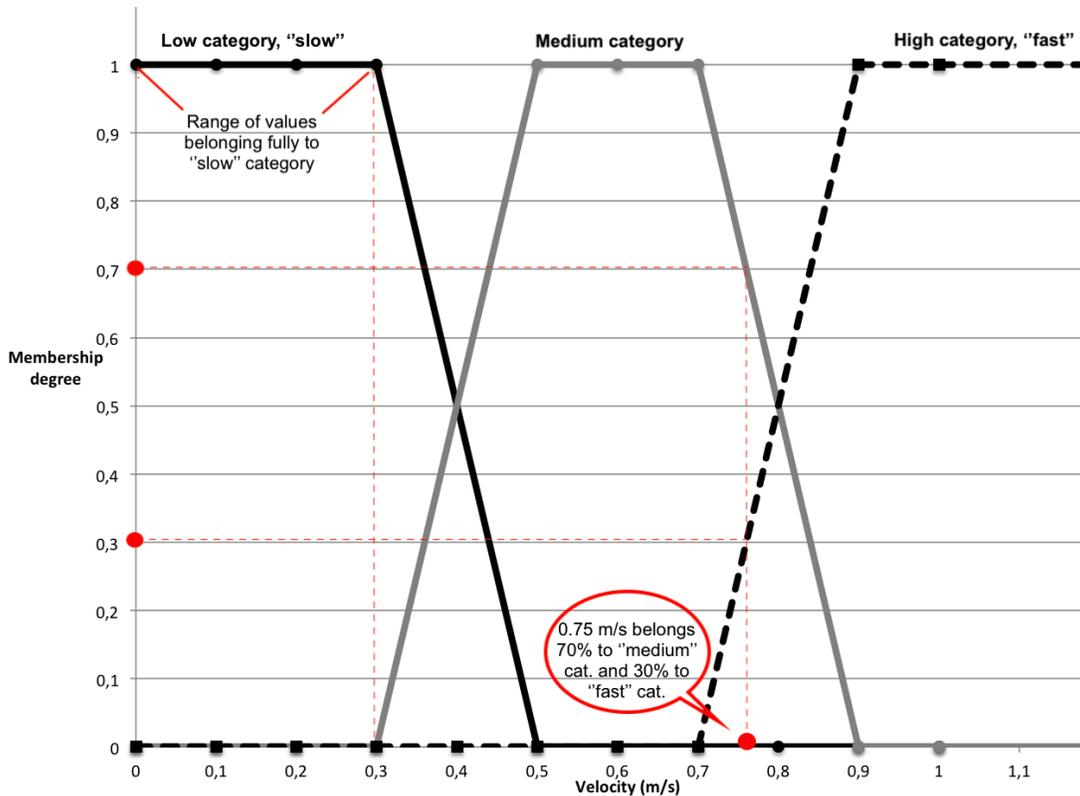


Figure 3-1 : Example of fuzzy sets defined by an expert for the velocity.

Once the categories were delimited, the experts had to qualify the habitat resulting from the combination of each category of variables. The fuzzy rules are all constructed using the following format: IF the substrate size is large, AND IF velocity is medium AND IF depth is low AND temperature is warm THEN habitat suitability is... either "poor", "medium" or "high" according to experts. Considering three categories for each of the four variables, there are a total of 81 combinations and their consequences (habitat suitability) is defined based on the experience of the respondent. Some habitat variables combinations are not found or are very rare in nature and therefore, are rarely used in the model. For example, if an expert determined that a fast velocity is greater than 2 m/s and a small substrate is less than 2mm. All the rules involving a fast velocity and a small

substrate would be unrealistic because in rivers, the water flowing at such high velocity would most likely flush out such fine substrate.

Experts selection

From April to October 2017, we interviewed experts with a concrete knowledge of Atlantic salmon parr habitat in order to gather and codify this knowledge (Mocq *et al.*, 2015). We gathered the opinions of 22 experts through meetings of which 18 answered the questions on their own. Two teams of two were also counted as one expert each. Among the participants, 18 work in the public sector, while five are in the private sector. In public organizations, we count teaching and research institutions (8), government departments (5) and non-profit organizations (5). There were eight technicians, three professors, eight managers and three graduate students. Our primary criterion for selecting an expert was that he had at least one year of hands-on experience with Atlantic salmon parr in Eastern Canada to optimize the model for this region, as the origin of the expert has been shown to influence the model outcome (Mocq *et al.*, 2015). The geographic origin of the expert's experience has been separated into seven different groups: Saguenay(15; Qc), North Shore (10; Qc), Ungava(3; Qc) and Quebec City (1) which are located on the north shore of the St. Lawrence River and Lower-St.Lawrence (6; Qc), Gaspésie(10; Qc) and New-Brunswick(3; NB) are located south of the St. Lawrence River. Their knowledge about habitat preferences could come either from literature or field experience. We did not measure their level of expertise, but still, we asked them to rate their level of confidence in their response from 1 (low confidence) to 10 (high confidence). We also contacted some of the experts who had already done a similar exercise with Mocq *et al.* (2013).

3.2.2 Field sampling

Sites selection and description

One of the objectives of the project was to validate whether the experts' opinion was consistent with what we could observe in the river. Site selection is based on three main criteria. The first one was presence of parr in the site area. The second criterion refers to the initial hypothesis of the study, i.e. that water temperature influences the quality of parr habitat as defined by the expert and that it influences habitat selection. Thus, we looked for sites where there was a potential thermal contrast such as a confluence of a river with a colder or warmer tributary. Since the hypothesis guiding the study is temperature-related, we defined the two compared areas as the "warm area" and the "cold area". To better understand the sampling protocol, figure 3-2 illustrates the definition of what is considered in this project as a site, an area (cold or warm) and a patch. The last criterion to choose the site was that similar habitats (depth, velocity and substrate size) exist in the warm and the cold areas. Comparing similar habitat types in both areas is an attempt to isolate the effect of the water temperature.

The warm and the cold areas had to be more than two meters large and no less than 40 m² each. The sampled area could be located directly in the tributary, in the tributary plume downstream of the confluence, upstream or downstream in the main channel, as long as the temperature was different and the other variables were comparable. According to those criteria, four sites have been chosen. The A and B sites are in the Ste-Marguerite River (SMA). This 100 km long river is in a mainly forested area between Chicoutimi and Sacré-Coeur on the Quebec North shore, Canada. The salmon population for this river was about 360 spawning adults in 2016 (MFFP, 2017) and the regional average summer air temperature for the last ten years is about 20.8°C. The C and D sites are in the Matapedia River' catchment on the Quebec South shore, Canada. Mean summer air temperature is about 21.6°C. Spawning adult population on this river was about 1940 in 2016 (MFFP, 2017). Figure 3-3 gives more details about the geographic position of the sites. In total 12 surveys were completed, which consist of electrofishing and habitat characterization.

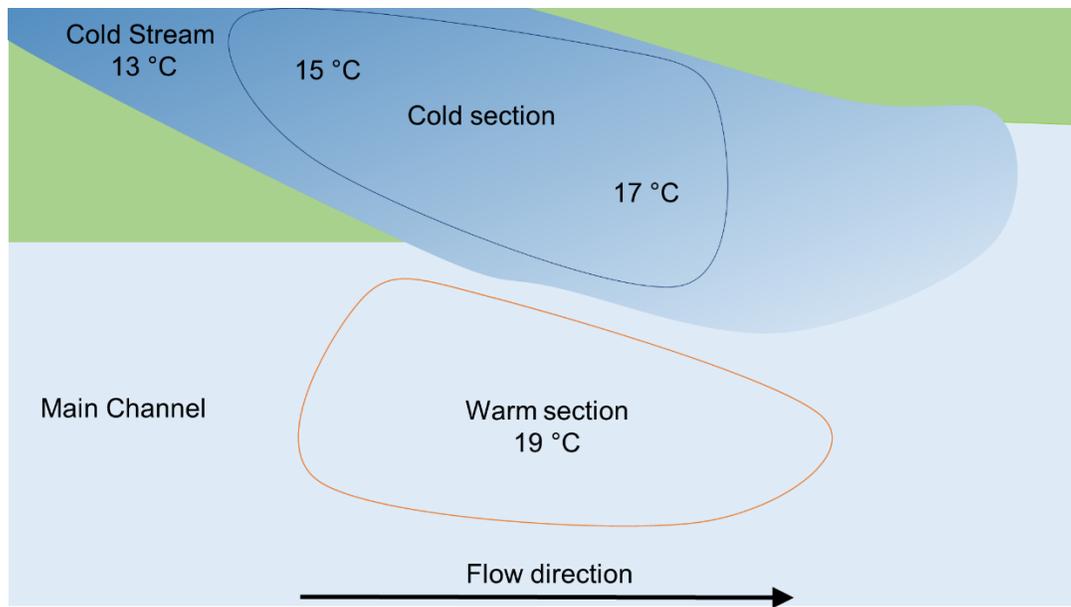


Figure 3-2 : Fictitious site to represent the sampling model. A site is composed of a cooler area usually generated by the inflow of a tributary and a corresponding warmer area, with roughly the same size. In both areas, several patches with an area of 0.79 m² are sampled for depth, velocity, substrate size and temperature, in presence and absence of fish. Figure inspire by Magazine Saumon, © Volume 41/No 3, Fall 2018 p. 33

Electrofishing protocol

A field campaign was undertaken from July 20th to September 26th 2017. We sampled five times site A, three times site B, three times site C and one time site D to compare parr densities in two thermally contrasted areas. Only a partial validation was performed. As previously explained, the 81 fuzzy rules were not all applied when the values measured during the sampling campaign were analyzed with the model. Furthermore, the electrofishing method restricted the sampling areas to relatively shallow reaches with relatively slow flowing water. We could not fish in an area deeper than hip height or when the water velocity was greater than 1.5 m/s with water depth higher than the knees.

When arriving at a fishing site, the area was scanned using the Seek Thermal Compact XR device to visualize water temperature spatial variability. Figure 3-4 shows a typical

site observed with the thermal camera. This infrared camera picture was assessed against spot measurements of temperature using a digital thermometer. Depending on the availability of contrasted habitat observed by thermal camera, warm and cold areas were

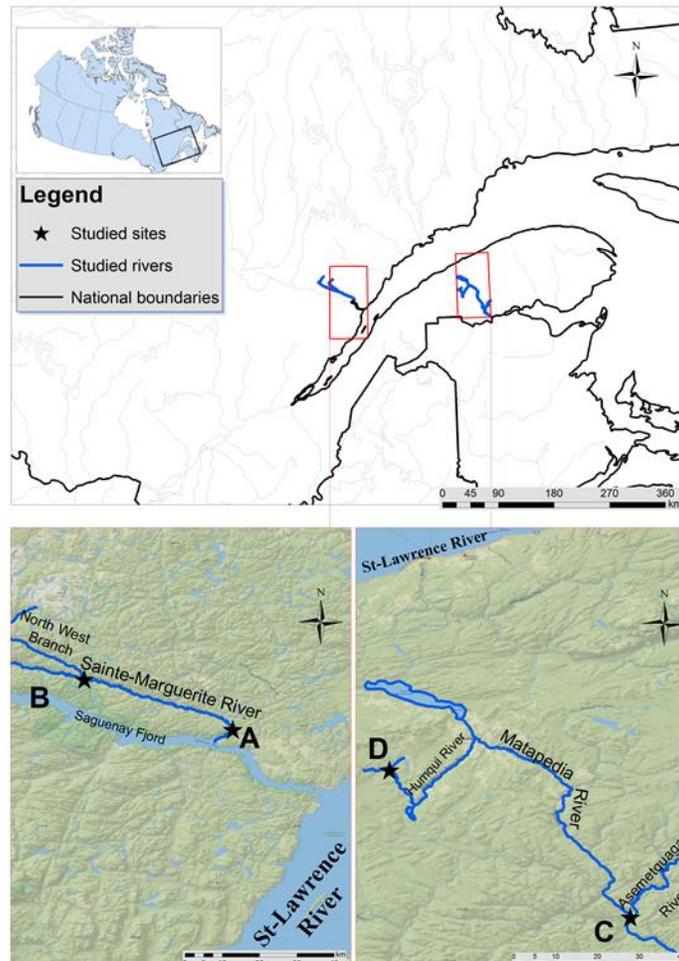


Figure 3-3 : Sites map

delimited to form fishing zones, each with an area between 50 and 150 m² (figure 3-2). In a designated site, we tried to compare areas with roughly the same surface. Habitat use was evaluated by electrofishing in groups of three people. The team included one person handling the electrofisher (Smith-Root LR-42 model) accompanied with two catchers holding a net. The electrofisher parameters (voltage, frequency, duty cycle) were programmed in "Direct Current" and according to water conductivity with the

automatic " Quick set-up " option in the menu. The voltage was adjusted in increments of 20 V until the optimum fish response was achieved, that is, galvanotaxi (e.g. involuntary swimming towards the anode) followed by a vigorous recovery in the following a 20 seconds. The electrofisher holder was placed upstream and perpendicularly to the catchers to perform a large swooping gesture with the anode ("M" shaped motion) in front of them, shocking an area of approximately 0.80 m². The electrofishing was repeated and carried out to cover the entire delimited area.

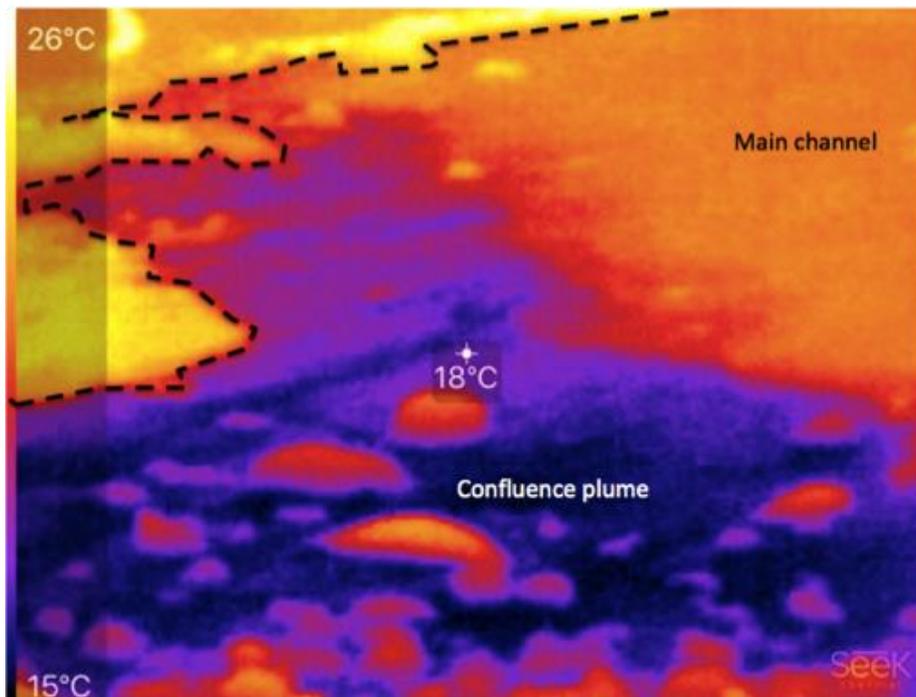


Figure 3-4 : Site A observed temperatures from upstream at the confluence of a cold tributary in Sainte-Marguerite river with the Seek thermal XR© device. Left of the dotted line is the bank while at the right it is possible to observe the thermal plume. In pale and dark purple: cold area and in orange: warm area.

When a parr was caught, its location was identified with a tag, the temperature was measured and the fish was placed in a container. The captured specimens were all weighed and measured. If two individuals were captured in the same 0.5 m radius patch (Keeley & Grant, 1995; Lindeman *et al.*, 2015), they were associated with the same habitat measurements. Once the measurements were made, fish were returned to the river, downstream of the sampling area. The electrofishing was made from downstream

to upstream while taking care never to trample the patches before fishing. The same exercise was performed in the cold and the warm area. We noted the total fishing time in each thermally contrasted area to ensure a constant fishing effort and the number of parr caught in each area have been used to calculate a density over a surface of 100 m².

Habitat

In the sampling zones, habitat variables were also surveyed in at least ten patches where no fish was caught or observed. While performing the electrofishing, patches were selected in a stratified random manner, so that the range of available velocities, depth and substrate were covered in the samples. The selected patches for characterization were also identified with tags. Temperature was measured instantly because it is a variable that can change over the fishing period. Once electrofishing was completed in the areas, the other habitat variables were measured at each location. The diameter (B-axis) of the dominant substrate was evaluated out of the 0.79 m² window around the tag. Depth and velocity at 40% of the total depth of the water column from the bed (Marsh McBirney flowmeter) was taken at the focal location of the tag. Sampling tags (placed for fishing and/or characterisations) were never located in the same 0.5 m habitat patch. At every site, two temperature sensors (Hobbo Pendant Temperature/Light Data Logger) were also placed, one in the main channel and one in the tributary. Water temperature $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ was recorded every 15 minutes from July 4th to September 20th 2017.

3.2.3 Model application

All field measurements were used as inputs in the fuzzy logic model to calculate Habitat Suitability Indices (HSI) using the Fuzzy logic toolbox in Matlab R2016b software. Like Mocq *et al.* (2013) and Ahmadi-Nedushan *et al.* (2008), the Mamdani inference was used to calculate HSI of patches sampled in the summer of 2017.

The two main steps in the fuzzy inference used to calculate HSI are called the implication and the defuzzification. This latter step allows to convert a fuzzy HSI set to a real HSI value. Those operations were completed for all sampled habitat patches, considering individual expert fuzzy sets and rules separately. When the values of all the habitat variables in the patch have a full membership to their respective category (membership degree of 1), a single fuzzy rule is involved. In this case, the conclusion function is defined by the full range of the consequence of the rule determined by the expert (low, medium or high habitat quality). As illustrated in figure 3-5, considering a substrate of 12 mm, a velocity of 0.1 m/s, depth: 1.4 m and a temperature of 10°C, an expert model would consider that his patch has a small substrate, low velocity, high depth, medium temperature and the consequence of this combination is low HSI. Since all the variables in the parcel have a membership degree (MD) of 1, the minimum of the conclusion function (implication) is also 1 or 100%. The numerical HSI of the patch will be determined by defuzzifying using the center of gravity of the area under the curve of the conclusion function.

Sometimes, many rules are necessary to describe a patch. Depending on the expert, the number of fuzzy rules applying to a habitat patch can vary between one to a maximum of 16. For instance, if the values of three variables (out of four) in the patch are in a fuzzy zone (i.e. having membership in two categories), eight rules will be needed to describe the patch. As seen on figure 3-6, when one value is in the fuzzy zone, two rules are necessary to describe the patch. Supposing a patch with a substrate of 100 mm, a velocity of 0.5 m/s, depth: 1.2 m and a temperature of 6 °C (in the fuzzy zone). According to this expert this patch has a small substrate, low velocity, high depth and water temperature is partly low and partly medium. The consequence of this combination is an aggregation of medium and high quality. The lowest membership degree (MD) among the variables combined in each rule determines the membership of the partial conclusion function. In this case the temperature value has a degree of membership of 0.4 for the first category and 0.6 for the second category. These MD values are transposed to the consequent HSI MD because they are the lowest values associated with each of the two rules being applied. Making an aggregation, by adding

the fuzzy sets representing the conclusion functions of each rule, provides the total conclusion function. The center of gravity of the area under the curve of this resulting aggregated function becomes the numerical HSI.

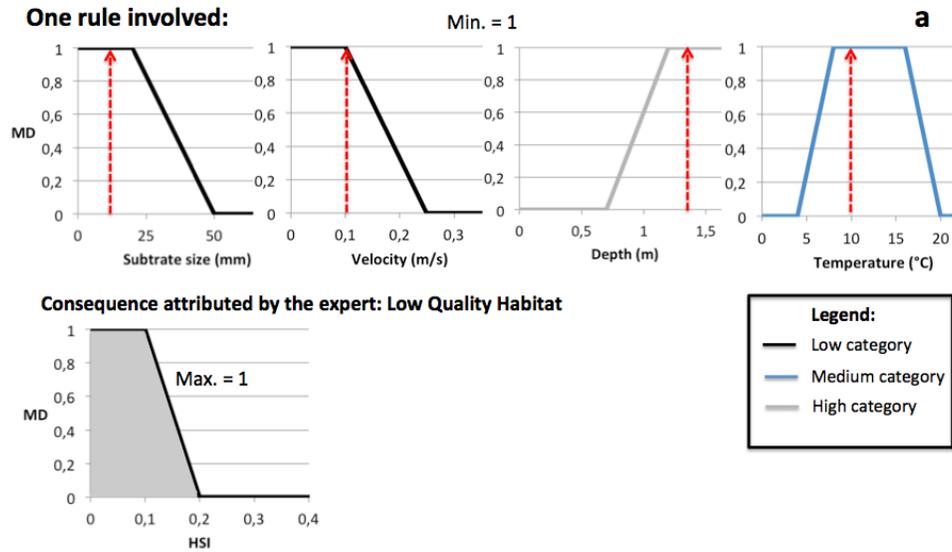


Figure 3-5 : Implication conclusion function associated with a unique rule

Two rules involved:

b

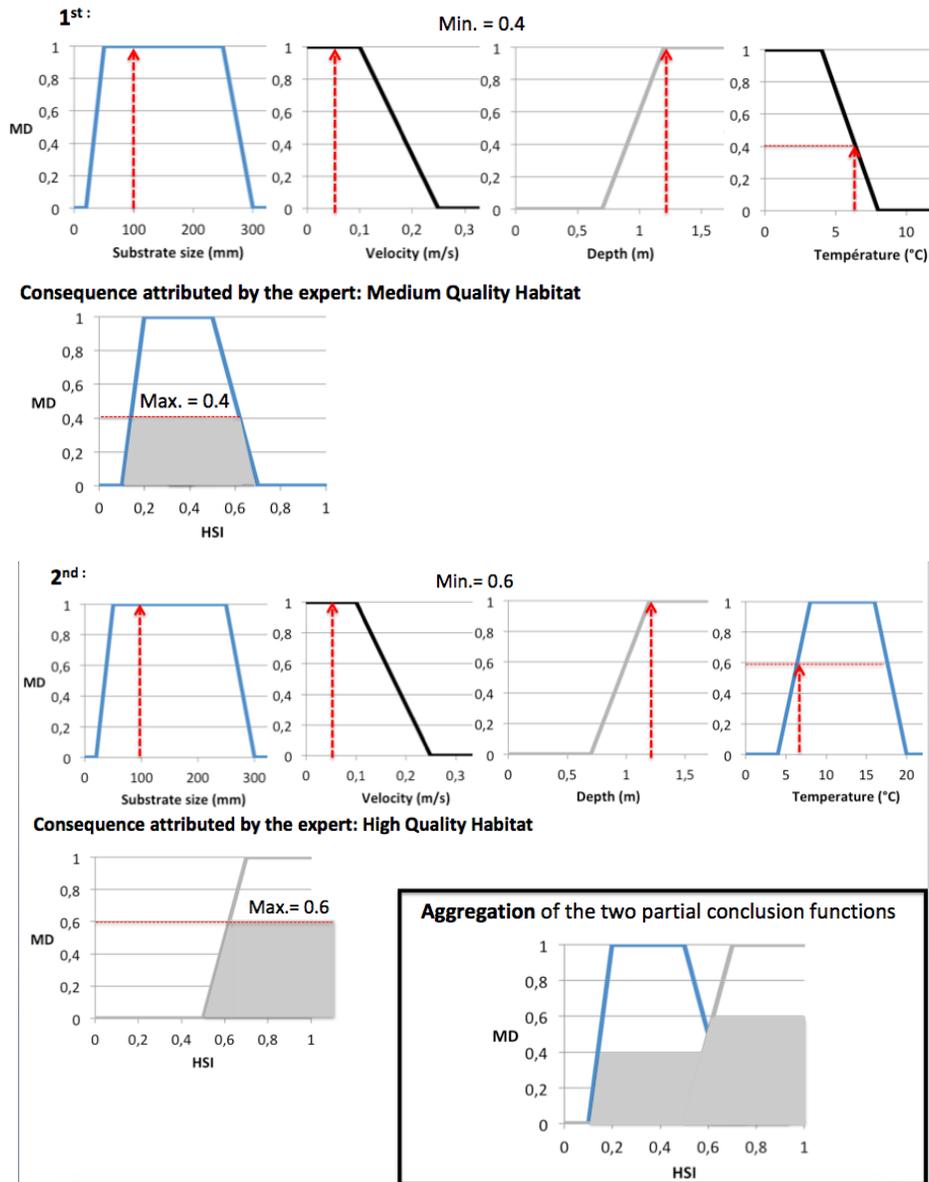


Figure 3-6 : Implication and aggregation of two conclusion functions associated with two rules

3.2.4 Model validation

Validation in a thermal contrast

The partial validation of the model was completed for every electrofishing and habitat survey (one day, one site), considering all experts' fuzzy models separately. A HSI was calculated for each sampled habitat patch, in presence and in absence of parr. Then, a

non-parametric Kruskal-Wallis test was used to verify the null hypothesis that the median HSI of the warm and cold areas of a fishing survey were equal with a confidence level $\alpha=0.05$. To facilitate the description of the results, we identified so-called "significant experts" when the experts model rejected the null hypothesis for an electrofishing survey, i.e. the model showed a significant difference in HSI values between thermally contrasted habitats. The global model was validated when the majority of the significant experts express a higher HSI in the area where higher parr density was measured.

Validation of observed density

A second partial model validation was conducted using a different data set from field surveys undertaken during summer 2017 between July 27th and September 16th on the Sainte-Marguerite (previously described) and the Petite-Cascapedia rivers located in the Gaspésie region (Eastern Québec). See figure 3-6 for rivers location. On these rivers, various sites were surveyed to cover a wide heterogeneity of salmon habitat. In total, 30 sites were surveyed on the Petite-Cascapedia River whereas 27 sites were surveyed on the Sainte-Marguerite River. These sites were at least separated by 500m along watercourse to ensure independence between sites. At each site, 30 equally spaced 4m² patches along five transects (six patches per transect) were electrofished and physically characterized as illustrated on figure 3-6. The same physical habitat variables were measured at each of those patches (depth, velocity, substrate size and water temperature). The only difference is that the velocity and temperature were measured using an acoustic velocity meter (Sontek Flow Tracker 2). After all measurements were completed in all patches, the mean value of these measurements was used as an input for the expert's models to obtain a HSI value for each of the sites. Finally, electrofishing was also conducted using the Smith-Root LR24 Electrofisher at each of these 30 patches. The parr relative density for a site was then obtained by summing the individual parr relative densities at each patch within the site. Hence, the relation between the HSI given by the experts and the relative parr relative density at each site can be investigated as another validation of the developed expert model.

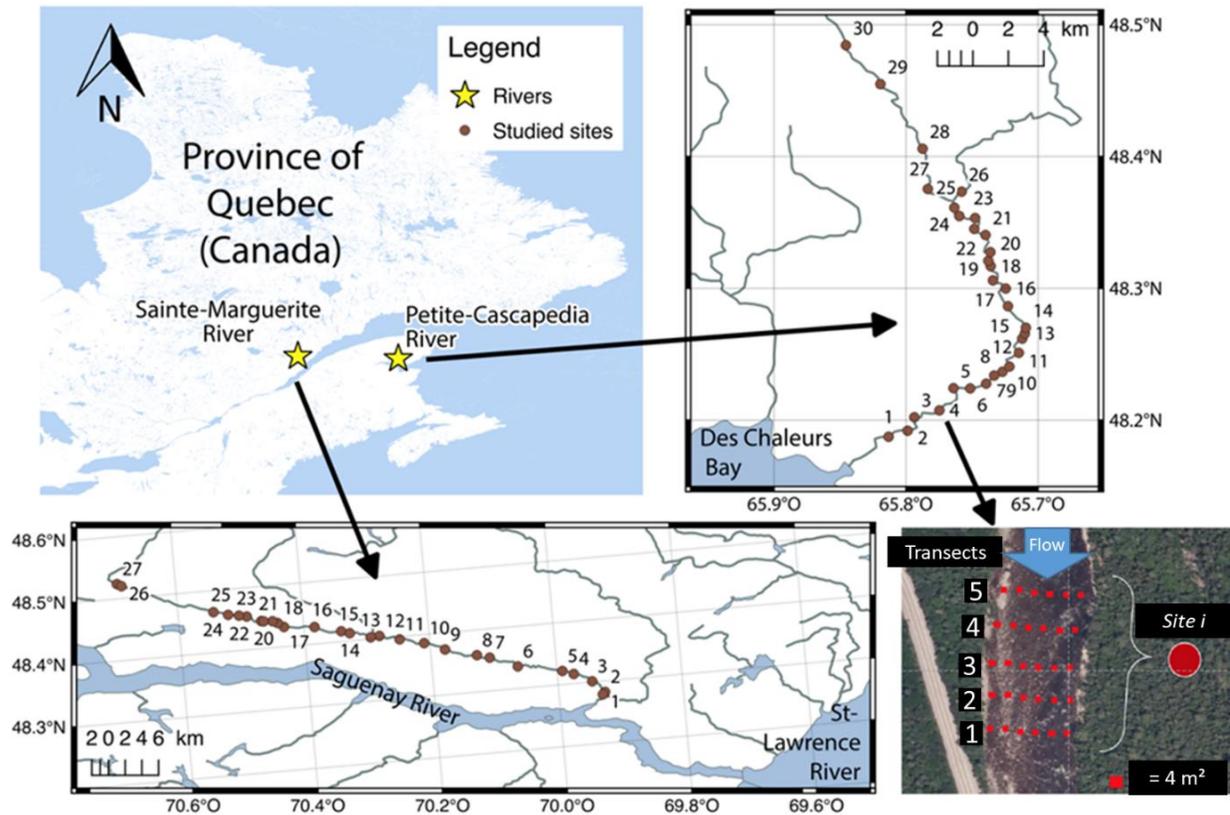


Figure 3-7 : Sites map for the second data set on Sainte-Marguerite and Petite-Cascapedia Rivers

3.3 Results

3.3.1 Experts based model

All 20 experts had to design fuzzy sets for each of the four input variables (temperature, velocity, depth and substrate) with three categories (low, medium to high). Table 3-1 shows the medians and ranges (maximum and minimum) of selected limits for fuzzy sets defining the categories of habitat variables. It can be seen that typically the variability (median/range) is between 0.2 and 2 %. For instance, experts defined roughly the “low” category for temperatures between 0 and 8 °C, “medium” category between 12 and 18 °C and “high” category over 22 °C.

As already mentioned, the 20 experts had to assign a consequent Habitat Suitability (poor, medium or high) for each combination of velocity, depth, substrate and temperature categories. Like Mocq *et al.* (2013), we identified the most frequently selected consequent HSI category as the “consensus” response and we calculated how many experts were part of this consensus. Considering the 81 rules, experts have a mean consensus of 63.7 %. In others words, about 13 experts out of 20 generally agree on rules consequence. Experts attributed a poor habitat for 64% of the rules, with a consensus of 68%. For half of those rules, there is about 11% of the experts that conclude, conversely, a high habitat quality. About 25 % of the rules have “ medium ” HSI as consequence, with a consensus of 53 %. Only 9 % of the rules have been associated with a “high” HSI and about 56 % of experts were part of this consensus. For 71 % of the rules with a high HSI consequence, a minority (2.8 %) of the experts concluded the opposite, i.e. that habitat was of poor quality. Two rules have no consensus, i.e. different consequent categories were selected by an equal number of experts.

3.3.2 Habitat characterization

During the summer, water temperature was measured every 15 minutes for July 7th to September 20th. The average summer water temperature in the main channel and in the tributary as well as the maximum temperature reached for study sites are compiled in table 3-2. For all surveys, physical habitat variables measurements were taken. Median values measured for the velocity ranged from 0.11 to 0.76 m /s, depths ranged from 0.11 to 0.38 m and substrate sizes ranged from 85 to 190 mm. Median temperatures ranged from 13.1 °C to 19.5 °C in the cold areas and from 16.1 °C to 21.8 °C in the warm areas. The thermal contrasts (median temperature differences) between cold and warm areas varied from 1.4 °C to 6.0 °C. For all electrofishing surveys completed, this thermal difference was statistically significant (Kruskal-Wallis; $p < 0.05$). Despite efforts to

Table 3-1 : Medians and ranges (maximum and minimum) of selected limits for fuzzy sets defining the categories of habitat variables.

	Substrate size (mm)				Velocity (m/s)				Depth (m)				Temperature (°C)			
	I	II	III	IV	I	II	III	VI	I	II	III	VI	I	II	III	VI
Minimum	5	10	45	64	0.05	0.2	0.45	0.55	0.02	0.15	0.35	0.4	4	8	16	19
Median	20	50	240	300	0.15	0.28	0.6	1	0.15	0.3	0.73	1	8	12	18	22
Maximum	100	200	700	1000	0.6	0.8	1.3	1.8	0.3	0.5	2	5	19	22	25	30

Where **I** represents the upper limit of full belonging the low category, **II** and **III** the limits of the full belonging range of the medium category and **IV** the lower limit of the full belonging range of the high category. See figure 3-1

Table 3-2 : Average summer water temperature in the main channel and in the tributary for study sites from July 4th to September 20th 2017

	Main stem temperature	Tributary temperature	Maximum temperature*
	(°C)		
Site A	17.3	10.7	25.2
Site B	16.5	14.8	23.5
Site C	17.7	15.4	25.3
Site D	14.8*	20.7*	25.8

*experienced at the site

**from 2016 because not available in 2017

sample areas with similar values for habitat variables other than temperature, for four electrofishing surveys, there were two significantly different habitat variables including water temperature and three surveys had three significantly different variables, when the Kruskal-Wallis test was applied. Table 3-3 gives more details about the median values of the variables sampled for each electrofishing survey. The variables that were significantly different are identified with an asterisk (*).

We characterized a total of 451 patches. Each patch generated a HSI value for each of the 20 experts. The analysis of the 451 patches also generated 21 031 applications of 66 different rules. The other 15 rules were never used. The most frequently used rule (3 798 times), which is when the values of the four variables belong to the medium category, represents 18 % of uses and 80 % of experts agree on the consequent HSI for this rule (high). The seven most frequently used rules are shown in table 3-4. They represent 63 % of rule applications, with a mean expert consensus of 60 %.

As already stated, HSI for each of the 20 experts were calculated for each sampled habitat patch. The mean standard deviation for HSI was 0.18 (HSI varies between 0 and 1). Only expert models that express a significant difference between median habitat quality in the colder and the warmer area were considered to partially validate the model. As shown in table 3-5, four experts expressed significant differences for more than 90 % of the fishing surveys, two experts never expressed significant differences and two others expressed differences for less than 10 % of fishing surveys. For 50 % of the surveys, experts that concluded to significant differences were unanimous to determine that the colder area had the highest habitat quality. For 17 % of the surveys, opinions were more split. Respectively for site A day 269 and site B day 201 (table 3-5), 56 % and 57 % of the significant experts agreed that the cold area was of better quality compared to 44 % and 43 % who said the opposite. For the other surveys, over 70 % of the experts agreed on the model conclusion.

Table 3-3 : Median values for each sampled variable and parr density (standardized on 100 m²) in the different areas (warm and cold) for each electrofishing survey.

	Julian day	Depth (m)		Velocity (m/s)		Substrate size (mm)		Temperature (°C)		Fish density		Model validation
		Cold	Warm	Cold	Warm	Cold	Warm	Cold	Warm	Cold	Warm	
A	201	0.29	0.38*	0.29	0.42	110	145	17.6	21.8*	14	0	Yes
	208	0.20	0.28	0.21	0.25	150	150	16.1	21.2*	16	8	Yes
	214	0.23	0.20	0.24*	0.13	115	175*	14.2	20.2*	9	28	No
	229	0.22	0.26	0.20	0.11	150	140	13.1	16.1*	7	11	No
	269	0.24	0.28	0.27	0.40	85	88	17.1	20.1*	7	6	Yes
B	201	0.21	0.33*	0.48	0.71	90	120	19.5	20.9*	5	3	Yes
	209	0.28	0.34	0.76	0.74	140*	100	15.2	18.1*	13	1	Yes
	215	0.27	0.29	0.68	0.63	120	120	17.0	19.2*	7	0	Yes
C	206	0.32*	0.20	0.52*	0.42	165	190	13.9	19.5*	4	22	No
	212	0.19	0.22	0.33*	0.24	110	130	16.1	19.3*	9	20	No
	234	0.11	0.17*	0.26	0.36	105*	90	16.2	21.1*	16	13	Yes
D	206	0.22	0.25	0.43	0.52	100	95	16.5*	18.3*	6	14	No

(*) indicates that the median was significantly higher.

Table 3-4 : The most frequently used rules

Rule	Substrate	Velocity	Depth	Temperature	Number of applications
41	Medium	Medium	Medium	Medium	3798
42	Medium	Medium	Medium	Warm	2047
29	Medium	Slow	Low	Medium	1927
32	Medium	Slow	Medium	Medium	1789
68	Tall	Medium	Medium	Medium	1379
50	Medium	Fast	Medium	Medium	1162
33	Medium	Slow	Medium	Warm	1074

Table 3-5 : Median HSI for both warm and cold areas of each site, according to the 20 experts

Sites	Days	Sections	Experts																			
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
A	201	cold	0,57	0,68	0,59	0,64	0,33	0,54	0,64	0,65	0,53	0,77	0,56	0,53	0,81	0,86	0,48	0,72	0,70	0,37	0,52	0,43
		warm	0,38	0,34	0,29	0,80	0,30	0,63	0,78	0,87	0,55	0,80	0,33	0,59	0,36	0,29	0,50	0,55	0,73	0,13	0,54	0,48
	208	cold	0,60	0,64	0,69	0,56	0,31	0,54	0,51	0,57	0,38	0,49	0,67	0,51	0,61	0,88	0,50	0,60	0,62	0,47	0,29	0,20
		warm	0,38	0,54	0,36	0,51	0,30	0,59	0,55	0,55	0,19	0,77	0,33	0,48	0,39	0,54	0,50	0,60	0,61	0,13	0,44	0,37
	214	cold	0,66	0,70	0,69	0,55	0,30	0,54	0,43	0,53	0,40	0,54	0,68	0,51	0,64	0,87	0,50	0,60	0,59	0,48	0,24	0,26
		warm	0,38	0,62	0,46	0,52	0,30	0,53	0,44	0,49	0,18	0,46	0,33	0,50	0,42	0,87	0,50	0,61	0,59	0,12	0,17	0,17
	229	cold	0,79	0,75	0,69	0,61	0,30	0,56	0,41	0,58	0,55	0,63	0,68	0,51	0,75	0,87	0,50	0,64	0,64	0,48	0,23	0,27
		warm	0,77	0,62	0,69	0,53	0,35	0,56	0,35	0,57	0,54	0,41	0,68	0,52	0,54	0,87	0,50	0,67	0,69	0,47	0,15	0,17
	269	cold	0,61	0,63	0,50	0,49	0,32	0,54	0,47	0,60	0,52	0,68	0,59	0,51	0,73	0,86	0,50	0,68	0,64	0,38	0,37	0,43
		warm	0,38	0,66	0,40	0,80	0,31	0,53	0,70	0,78	0,52	0,80	0,33	0,63	0,52	0,86	0,31	0,70	0,68	0,13	0,52	0,52
B	201	cold	0,42	0,64	0,43	0,58	0,29	0,53	0,60	0,65	0,52	0,77	0,42	0,52	0,59	0,63	0,40	0,79	0,59	0,12	0,52	0,47
		warm	0,38	0,88	0,40	0,38	0,31	0,53	0,78	0,56	0,55	0,80	0,33	0,58	0,45	0,50	0,50	0,67	0,63	0,13	0,65	0,52
	209	cold	0,80	0,88	0,69	0,38	0,35	0,54	0,76	0,57	0,88	0,80	0,85	0,70	0,85	0,49	0,75	0,82	0,63	0,68	0,56	0,58
		warm	0,56	0,88	0,61	0,39	0,36	0,52	0,73	0,57	0,66	0,78	0,52	0,88	0,81	0,50	0,35	0,82	0,67	0,34	0,74	0,63
	215	cold	0,66	0,88	0,69	0,49	0,35	0,54	0,73	0,59	0,74	0,78	0,63	0,67	0,84	0,50	0,69	0,82	0,63	0,44	0,52	0,58
warm		0,46	0,88	0,51	0,59	0,32	0,53	0,78	0,59	0,59	0,78	0,44	0,81	0,65	0,50	0,50	0,81	0,64	0,13	0,52	0,58	
C	206	cold	0,80	0,88	0,69	0,63	0,33	0,54	0,52	0,60	0,88	0,80	0,85	0,57	0,85	0,55	0,59	0,78	0,64	0,49	0,52	0,54
		warm	0,42	0,72	0,49	0,55	0,29	0,53	0,54	0,57	0,27	0,58	0,40	0,52	0,61	0,87	0,50	0,76	0,59	0,12	0,52	0,46
	212	cold	0,75	0,80	0,69	0,72	0,32	0,54	0,70	0,74	0,55	0,76	0,80	0,51	0,85	0,87	0,50	0,73	0,62	0,47	0,52	0,47
		warm	0,44	0,73	0,52	0,63	0,30	0,53	0,71	0,59	0,26	0,62	0,43	0,52	0,62	0,87	0,50	0,69	0,61	0,13	0,37	0,34
	234	cold	0,49	0,71	0,69	0,60	0,27	0,54	0,52	0,51	0,33	0,50	0,72	0,51	0,83	0,87	0,50	0,63	0,53	0,46	0,30	0,34
warm		0,36	0,53	0,36	0,61	0,28	0,53	0,58	0,56	0,36	0,66	0,33	0,46	0,43	0,61	0,40	0,55	0,58	0,12	0,44	0,46	
D	206	cold	0,69	0,88	0,69	0,58	0,33	0,54	0,69	0,60	0,76	0,78	0,68	0,52	0,85	0,86	0,50	0,76	0,61	0,46	0,52	0,49
		warm	0,52	0,74	0,50	0,48	0,31	0,53	0,58	0,57	0,58	0,72	0,50	0,51	0,76	0,50	0,43	0,81	0,62	0,31	0,52	0,47

The boxes in gray indicate a significant difference between cold and warm areas. The light gray boxes indicate that significant experts who established that habitat quality was higher in the cold area than in the warm area for this electrofishing survey. In dark grey boxes, the experts established that habitat quality was significantly better in the warm area

3.3.3 Electrofishing

For our analysis, we considered only the specimens with fork length >55 mm as parr. A total of 226 parr (1+ and 2+), in 201 different patches were captured or clearly observed during the summer. For all the electrofishing surveys, we standardized the number of fish that we caught in each area (colder vs warmer) by prorating densities for an area of 100 m². As seen in table 3-3, among all the electrofishing surveys, the highest density of fish was found in median temperature ranges of 15.2 to 20.2 °C, which is in agreement with the known temperature optimum for parr feeding of 15 to 19 °C according to the literature (Elson, 1969; DeCola, 1970; Stanley & Danie, 1983; Elliott, 1991). We did not found any fish in the warmest area (21.8 °C). Moreover, when the warm areas exceeded 20.9 °C 42 % more fish were caught in the colder area. We also see that when the colder area offers temperatures lower than the feeding optimum range (<15.0 °C), parr were mostly found (48 % more) in the warm area.

3.3.4 Model application and validation

Validation in a thermal contrast

As indicated in table 3-3, the model was partially validated seven times and was shown to be inconclusive five times. As already explained, validation was conclusive when the highest fish density was found in the area with the highest modelled HSI values for a majority of experts. Every time the model was not validated, most of experts predicted a better quality of habitat in the cooler area while the highest parr density was in the warmer area. For site A, the model was validated three times out of five surveys. When the model was not validated for this site (day 214 and 229; table 3-3), the temperatures of the cold area were respectively 14.2 and 13.1 °C. For day 214, we note that the velocity and the substrate size were also significantly different between the two areas (lower velocity and larger substrate in the warm area). For site B, the model was always validated. At that site, temperature values were always in a range that is adequate for parr (15.2-20.9 °C). For day 201, depth was significantly higher in the warm area (0.21

vs 0.33 m) than in the colder area and for day 209, the substrate was significantly larger in the colder area (100 vs 140 mm) than in the warmer area. At site C, the model was invalidated for the first two electrofishing surveys. In the first case, the temperature of the cold area was 13.9 °C while temperature in the warm area was 19.2 °C. Also, the velocity and the substrate size were significantly higher in the cold area than in the warm area. In the second case, the temperature of the cold zone was 16.1 °C while the temperature of the warm area was only 19.3 °C. The velocity was also significantly faster in the cold area. The model was validated for the third electrofishing survey at this site while the temperature in the warm area was 21.1 °C and 16.2 °C in the cold area. The depth was also significantly greater in the warm area (0.11 vs 0.17 m) and the substrate was larger in the cold area (90 vs 105 mm). Finally, for site D, the model has not been validated for the only electrofishing survey that was completed at that site. The temperatures in the warm and cold areas were respectively 18.3 °C and 16.5 °C.

Validation of observed relatives densities

Concerning the validation of the model with the additional dataset collected on Sainte-Marguerite and Petite-Cascapedia River, figure 3-7 illustrates the link between the logarithmic transformation of parr relative density (1+ and 2+) at each site and predicted HSI from the model of Mocq *et al.* (2013) considering depth, velocity and substrate size (a) and against our expert's model including the same three variables and water temperature (b). Our model explains respectively 37 % and 15 % of the parr relative density for Ste-Marguerite and Petite-Cascapedia rivers while the model without water temperature explains respectively 18 % and 1 %. Based on a F-test comparing the model that includes HSI to explain log density to a simpler model that includes only an intercept, the p-value of 0.036 means that the model that includes HSI is significantly different than an intercept-only model.

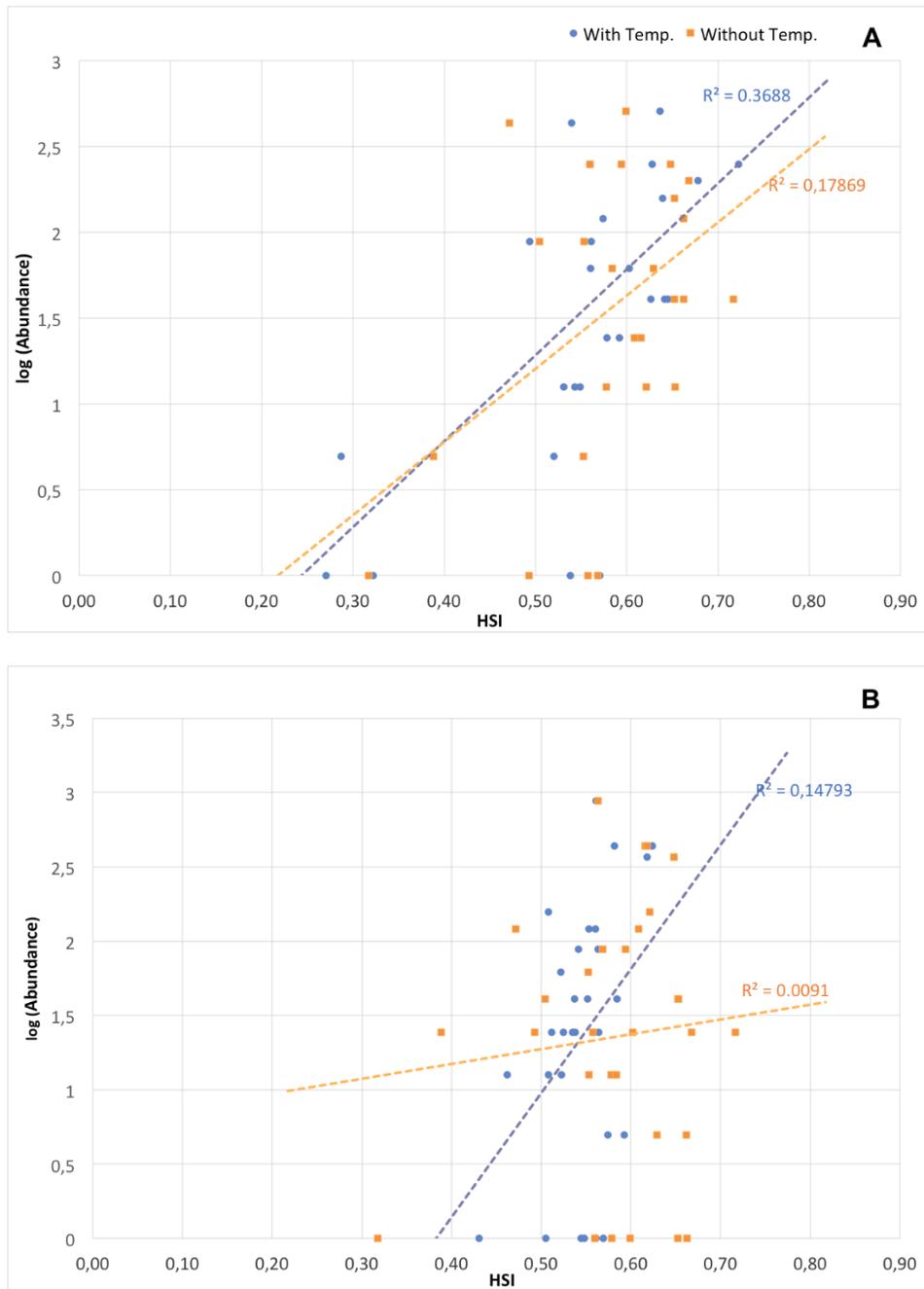


Figure 3-8 : a) Link between relative density and HSI for the model with temperature (blue) and without temperature (orange) for the Sainte-Marguerite River and b) the Petite-Caspédia River.

3.4 Discussion

The main objective of this project was to include water temperature in an expert based model to better quantify and qualify habitat for Atlantic salmon parr. This main objective was achieved by completing two steps. The first one was to codify the knowledge of selected experts on four habitat variables: water temperature, depth, velocity and substrate size. These experts also had to qualify the Habitat Suitability Index resulting from the different combinations of these variables. The second step was to perform a partial validation of the model by including field data to the model in order to obtain a numerical HSI, and compare it against parr density with and without a thermal contrast at different sites. This work therefore presents an improvement from the models developed used by Ahmadi-Nedushan *et al.* (2008) and Mocq *et al.* (2013).

We selected 20 professionals with an Eastern Canadian experience to optimize the model for this region. The model has been validate for 58 % of the surveys, which means that 7 times out of 12, the highest relative fish density was found in the area with the significantly highest HSI value according to a majority of experts. Considering that it is the first fuzzy model that includes water temperature for Atlantic salmon parr, and considering that sampling was completed in a summer with relatively low temperature contrasts (i.e. no heat waves or sustained warm periods) this result is promising and constitutes an important advancement.

The first validation method implied to compare habitat quality between cold and warm areas. When the model was not validated, it predicted that higher quality habitat would be in a cold zone, whereas parr were mostly in warm areas. We suspect that the main cause explaining why 42 % of the electrofishing surveys could not validated the model is that the summer 2017 in Quebec was not particularly warm and hence, cold water temperature refuges in the sampled rivers were often not necessary for parr. The temperature sensors placed at the sites under study revealed that the hottest temperature of the water during the summer period, all sites combined, was 25.8 °C

which is not close to the upper incipient lethal temperature (27.8 °C; death of 50 % of fish after 7 days). When this temperature was reached, it generally lasted for less than two hours. For sites A, B and C there was respectively 19, 7 and 18 days where temperature exceeded 22 °C. This temperature represents the upper critical range where normal metabolic functions cease, but parr can still survive for a long period of time at that temperature (Jonsson & Jonsson, 2009). However, 22 °C never persisted for more than 12 hours. At night, the temperature generally decreased below 20 °C. This might give a rest to fish by recreating the effect of a thermal refuge. Nonetheless, at site D, there were 31 days where temperature exceeded 23 °C and rarely cooled down below 20 °C. There was a particular warm period between day 195 and day 207 (from July 17 to July 23) where the average daily water temperature remained above 22 °C. The maximum temperature reached during this period was 25.8 °C while the minimum never went below 20.6 °C which is considerably high for a prolonged period. Even if Site D was the warmest, our unique electrofishing survey at this site was completed during a cooler period and thus, the model was not validated. Furthermore, among all the surveys, it was common to compare two areas whose average temperatures were both in the tolerable, almost optimal range for parr. Such ranges generally do not trigger movement to cold refugia (Breau *et al.*, 2011).

As suggested by many authors (Kampichler *et al.*, 2000; Mouton *et al.*, 2008; Fukuda, 2009), we also attempted to test and compare the proposed model on a wider dataset. We can see on figure 3-7 that in both cases our four-variable model explains better the relative density of parr than the three-variable model, and this, for every site. This suggests that adding a variable such as water temperature improves the predictability of the model. Despite the considerable correlation that exists between the median HSI and the relative density of parr for Ste-Marguerite data ($R^2 = 0.37$), this correlation is less strong for Petite-Cascapedia data ($R^2 = 0.15$). This could be explained by the low heterogeneity of the habitats studied on this river. In fact, the lowest HSI model assigned in this river was more than 0.4, which is generally considered an average HSI, according to most experts. Thus, the patches sampled were all of considerable interest for parr and relatively similar. It goes without saying that all the parcels cannot be occupied, thus

leaving several interesting parcels vacant. Although the concept of transferability is not accepted by all (Grosheims & Orth, 1993; Leftwich *et al.*, 1997; Strakosh *et al.*, 2003), somehow the correlations revealed by these linear regressions presented above allow to be enthusiastic to the possibility of transferring this model to several rivers. Although some authors have tested the transferability of regional type models, the correlation that we obtained on the Ste-Marguerite River has not, to our knowledge, been previously equalled (e.g. $R^2 = 0.02$ to 0.31 ; Guay *et al.*, 2003, Hedger *et al.*, 2004). The fact that the correlation is considerably higher for the Sainte-Marguerite River raises new questions about the origin of the respondent's experience. In fact, it is possible to note that the expertise of our respondents comes mainly from the north shore of Quebec (60%). Thus, perhaps the model could be better optimized for cooler rivers considering that the specific adaptations of juveniles in the north and south may be different (Glozier *et al.*, 1997; Hedger *et al.*, 2004).

Even if the proposed model is less parsimonious than its predecessors, it is still a simplification of a complex system that influences parr habitat selection. It implies only four physical variables but do not include many important ones for habitat selection such as habitat connectivity (Bardonnet & Baglinière, 2000), biomass cover and food abundance (Wilzbach, 1985), circadian and seasonal cycle (Cunjak, 1996; Mäki-Petäys *et al.*, 2004), growth and age (see table 3-6), density dependent relationship (Jonsson *et al.*, 1998; Lindeman *et al.*, 2015), etc. As habitat selection by parr are based on many biotic and abiotic factors (Armstrong *et al.*, 2003; Klemetsen *et al.*, 2003), it has been shown many times that HSI and WUA are ambiguous concept because it is hard to link them to fish abundance (Milhous *et al.*, 1989; Bourgeois *et al.*, 1996). Even in the case where a large number of good habitat patches exist on a river, parr could actually use few of them. Conversely, it is also possible to find parr in habitats of poor quality with little or no explanation for their presence.

Table 3-6 : Preferred parr physical habitat (Symons & Heland, 1978; Baglinière *et al.*, 1987; Gibson, 1993; Dumas & Prouzet, 1994; Heland & Dumas, 1994; Heggenes *et al.*, 1999; Armstrong *et al.*, 2003)

	Depth (m)	Velocity (m/s)	Substrate (mm)
1+ parr*	< 0.25	0.10-0.65	16-256
2+ parr**	> 0.20-0.30		64-512

* Second summer of growth in river

**Third summer of growth in river

Globally, our expert models suggest that a cooler temperature would offer a better habitat quality, which is probably more exact during warmer periods but less accurate when both sections offer a tolerable range of temperature or a contrast that is not optimal (e.g. an area that is too cold vs a tolerable warm area). We did see that when the warm area was hotter than 20.8 °C, the model is always validated and parr were mostly in the cold area as predicted by the experts. This systematic validation for higher temperatures suggests that the model is adequate when limiting temperatures are reached (Breau *et al.*, 2007; Jonsson & Jonsson, 2009; Elliott & Elliott, 2010).

On the other hand, even if parr can survive near 0° C and still feed at 3.8 °C (Elliott, 1991), growth is largely linked to optimal physiological processes that occur at the preferred feeding temperature (Storebakken & Austreng, 1987) and it starts being suboptimal below 15 °C (DeCola, 1970). Despite this, for some electrofishing surveys, the majority of significant experts indicated that 14.2 °C, 13.1 °C and 13.9 °C would offer respectively better habitat quality than 20.2 °C, 16.1 °C and 19.5 °C. Our electrofishing results suggest that this may not be accurate.

In that context, it would be beneficial to review with the experts, the parameters assigned for the temperature categories, and the consequent HSI category (de Little *et al.*, 2018). Especially considering that a part of the model bias could come from an incomplete explanation by the questioner or from a misinterpretation between the

interlocutors. For this model, we suspect that questioning the expert in a feeding context rather than in a survival context would provide a better setting when discussing parr preferences. Also, several experts verbally testified during the exercise that having four categories instead of three for the output variable would facilitate the attribution of consequences to the rules. These categories could be poor, medium, high and very high HSI. Unlike adding a category to input variables, adding an output category would not affect the number of rules to answer by experts. This modification could be done during a new consultation with the experts.

As many other studies on habitat model there is still a need for further validation to prove that this model could be an effective management tool (Guay *et al.*, 2000; Lamouroux & Capra, 2002; Ahmadi-Nedushan *et al.*, 2008; Mocq *et al.*, 2013; Bargain *et al.*, 2018). Even if multiple-experts based model has been identified as potentially highly exportable (Annear *et al.*, 2002) It would be primordial to gather data from other studies on parr from different river types and different thermal regimes for further validation.

Acknowledgments

The authors would like to thank the partners and the funding organization Mitacs Accelerate, the Atlantic Salmon Conservation Foundation as well as la Fondation Saumon for their incredible generosity. We also want to thank all the technicians, colleagues and interns who help accomplish fieldwork as well as the scientific support provide by members of the research groups of A. St-Hilaire and N. Bergeron. Warm thanks to all the experts who took their precious time to understand this logic that carries its name so well. Special thanks to Carole-Anne Gillis, Danielle Frechette, Dorra Hamami, Anik Daigle, Claudine Boyer, Hermine Betis, Habiba Ferchichi, André Boivin, Sébastien Ouellet-Proulx, André Boivin, Marc-André Pouliot, Killian Dolais, Andrée-Sylvie Carbonneau, Michael Deetjens and Antoine Boudry.

3.5 References

- Ahmadi-Nedushan B, St-Hilaire A, Berube M, Ouarda T & Robichaud E (2008) Instream flow determination using a multiple input fuzzy-based rule system: A case study. *River Research and Applications* 24(3):279-292.
- Annear T, Chisholm I, Beecher H, Locke A, Aarrestad P, Burkardt N, Coomer C, Estes C, Hunt J & Jacobson R (2002) *Instream flows for riverine resource stewardship*.
- Armstrong J, Kemp P, Kennedy G, Ladle M & Milner N (2003) Habitat requirements of Atlantic salmon and brown trout in rivers and streams. *Fisheries research* 62(2):143-170.
- Ayllón D, Almodóvar A, Nicola G & Elvira B (2012) The influence of variable habitat suitability criteria on PHABSIM habitat index results. *River Research and Applications* 28(8):1179-1188.
- Baglinière J, Prouzet P, Porcher J, Nihouarn A & Maisse G (1987) Caractéristiques générales des populations de saumon atlantique (*Salmo salar* L.) des rivières du Massif armoricain. *La restauration des rivières à saumons, INRA, Paris* :23-37.
- Bardonnet A & Baglinière J-L (2000) Freshwater habitat of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 57(2):497-506.
- Bargain A, Fogliani F, Pairaud I, Bonaldo D, Carniel S, Angeletti L, Taviani M, Rochette S & Fabri M (2018) Predictive habitat modeling in two Mediterranean canyons including hydrodynamic variables. *Progress in Oceanography*.
- Bourgeois G, Cunjak RA, Caissie D & El-Jabi N (1996) A spatial and temporal evaluation of PHABSIM in relation to measured density of juvenile Atlantic salmon in a small stream. *North American Journal of Fisheries Management* 16(1):154-166.
- Bovee KD, Lamb BL, Bartholow JM, Stalnaker CB & Taylor J (1998) Stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology. (DTIC Document).
- Boyer C, St-Hilaire A, Bergeron N, Curry RA, Caissie D & Gillis C-A (2016) Technical Report: RivTemp: A Water Temperature Network for Atlantic salmon rivers in Eastern Canada. *Water News, Canada Water Association Newsletter* (Spring Edition).
- Breau C, Cunjak R & Bremset G (2007) Age-specific aggregation of wild juvenile Atlantic salmon *Salmo salar* at cool water sources during high temperature events. *Journal of Fish Biology* 71(4):1179-1191.
- Breau C, Cunjak RA & Peake SJ (2011) Behaviour during elevated water temperatures: can physiology explain movement of juvenile Atlantic salmon to cool water? *Journal of Animal Ecology* 80(4):844-853.
- Caron F, Fontaine P-M & habitats SdlfedpdQDdlfed (1999) *Seuil de conservation et cible de gestion pour les rivières à saumon (Salmo salar) du Québec*. [Québec]: Faune et parcs Québec,
- Cunjak RA (1996) Winter habitat of selected stream fishes and potential impacts from land-use activity. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 53(S1):267-282.
- de Little SC, Casas-Mulet R, Patulny L, Wand J, Miller KA, Fidler F, Stewardson MJ & Webb JA (2018) Minimising biases in expert elicitations to inform environmental management: Case studies from environmental flows in Australia. *Environmental Modelling & Software* 100:146-158.

- DeCola JN (1970) Water quality requirements for Atlantic salmon. (Federal Water Quality Administration, Needham Heights, Mass.(USA). New England Basins Office).
- DeGraaf D & Bain L (1986) Habitat use by and preferences of juvenile Atlantic salmon in two Newfoundland rivers. *Transactions of the American Fisheries Society* 115(5):671-681.
- Dumas J & Prouzet P (1994) Repeuplement et pacage marin. *Le Saumon atlantique* :239-254.
- Elliott J (1991) Tolerance and resistance to thermal stress in juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar*. *Freshwater Biology* 25(1):61-70.
- Elliott J & Elliott J (2010) Temperature requirements of Atlantic salmon *Salmo salar*, brown trout *Salmo trutta* and Arctic charr *Salvelinus alpinus*: predicting the effects of climate change. *Journal of fish biology* 77(8):1793-1817.
- Elson P (1969) High temperature and river ascent by Atlantic salmon. *ICES Anadromous and Catadromous Fish Comm.*, CM 1000:12.
- Fukuda S (2009) Consideration of fuzziness: Is it necessary in modelling fish habitat preference of Japanese medaka (*Oryzias latipes*)? *Ecological Modelling* 220(21):2877-2884.
- Garside E (1973) Ultimate upper lethal temperature of Atlantic salmon *Salmo salar* L. *Canadian Journal of Zoology* 51(8):898-900.
- Gendron J-F (2013) Physical controls on summer thermal refuges for salmonids in two gravel-cobble salmon rivers with contrasting thermal regimes: the Ouelle and Ste. Marguerite rivers.
- Gibbins C & Acornley R (2000) Salmonid habitat modelling studies and their contribution to the development of an ecologically acceptable release policy for Kielder Reservoir, North-east England. *River Research and Applications* 16(3):203-224.
- Gibson R (1993) The Atlantic salmon in fresh water: spawning, rearing and production. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 3(1):39-73.
- Glozier NE, Culp JM & Scrimgeour GJ (1997) Transferability of habitat suitability curves for a benthic minnow, *Rhinichthys cataractae*. *Journal of freshwater ecology* 12(3):379-393.
- Groshens T & Orth D (1993) Transferability of habitat suitability criteria for smallmouth bass, *Micropterus dolomieu*. *Rivers* 4(3):194-212.
- Guay J, Boisclair D, Leclerc M & Lapointe M (2003) Assessment of the transferability of biological habitat models for Atlantic salmon parr (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 60(11):1398-1408.
- Guay J, Boisclair D, Rioux D, Leclerc M, Lapointe M & Legendre P (2000) Development and validation of numerical habitat models for juveniles of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 57(10):2065-2075.
- Hedger R, Dodson J, Bergeron N & Caron F (2004) Quantifying the effectiveness of regional habitat quality index models for predicting densities of juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Ecology of freshwater fish* 13(4):266-275.
- Heggenes J, Bagliniere J & Cunjak R (1999) Spatial niche variability for young Atlantic salmon (*Salmo salar*) and brown trout (*S. trutta*) in heterogeneous streams. *Ecology of Freshwater Fish* 8(1):1-21.
- Heland M & Dumas J (1994) Ecologie et comportement des juvéniles. *Le saumon atlantique* :29-46.

- Isaak D, H Luce C, L Horan D, Chandler G, Wollrab S & David N (2018) *Global Warming of Salmon and Trout Rivers in the Northwestern U.S.: Road to Ruin or Path Through Purgatory?*
- Jeong DI, Daigle A & St-Hilaire A (2013) Development of a stochastic water temperature model and projection of future water temperature and extreme events in the Ouelle River basin in Québec, Canada. *River Research and Applications* 29(7):805-821.
- Jonsson B & Jonsson N (2009) A review of the likely effects of climate change on anadromous Atlantic salmon *Salmo salar* and brown trout *Salmo trutta*, with particular reference to water temperature and flow. *Journal of fish biology* 75(10):2381-2447.
- Jonsson N, Jonsson B & Hansen L (1998) The relative role of density-dependent and density-independent survival in the life cycle of Atlantic salmon *Salmo salar*. *Journal of Animal Ecology* 67(5):751-762.
- Jorde K, Schneider M, Peter A & Zoellner F (2001) Fuzzy based models for the evaluation of fish habitat quality and instream flow assessment. *Proceedings of the 2001 International Symposium on Environmental Hydraulics*. p 27-28.
- Kampichler C, Barthel J & Wieland R (2000) Species density of foliage-dwelling spiders in field margins: a simple, fuzzy rule-based model. *Ecological Modelling* 129(1):87-99.
- Keeley ER & Grant JW (1995) Allometric and environmental correlates of territory size in juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 52(1):186-196.
- Klemetsen A, Amundsen PA, Dempson J, Jonsson B, Jonsson N, O'connell M & Mortensen E (2003) Atlantic salmon *Salmo salar* L., brown trout *Salmo trutta* L. and Arctic charr *Salvelinus alpinus* (L.): a review of aspects of their life histories. *Ecology of freshwater fish* 12(1):1-59.
- Lamouroux N & Capra H (2002) Simple predictions of instream habitat model outputs for target fish populations. *Freshwater biology* 47(8):1543-1556.
- Leftwich KN, Angermeier PL & Dolloff CA (1997) Factors influencing behavior and transferability of habitat models for a benthic stream fish. *Transactions of the American Fisheries Society* 126(5):725-734.
- Lindeman AA, Grant JW & Desjardins CM (2015) Density-dependent territory size and individual growth rate in juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Ecology of Freshwater Fish* 24(1):15-22.
- Mäki-Petäys A, Erkinaro J, Niemelä E, Huusko A & Muotka T (2004) Spatial distribution of juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*) in a subarctic river: size-specific changes in a strongly seasonal environment. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 61(12):2329-2338.
- McCullough DA (1999) *A review and synthesis of effects of alterations to the water temperature regime on freshwater life stages of salmonids, with special reference to Chinook salmon*. US Environmental Protection Agency, Region 10,
- MFFP Mdf, de la faune et des parcs (2017) Bilan de l'exploitation du saumon au Québec en 2016.), p 299 p.
- Milhous RT, Updike MA & Schneider DM (1989) Physical habitat simulation system reference manual: version II. (US Fish and Wildlife Service).

- Millidine K, Malcolm I & Fryer R (2016) Assessing the transferability of hydraulic habitat models for juvenile Atlantic salmon. *Ecological indicators* 69:434-445.
- Mocq J, St-Hilaire A & Cunjak R (2015) Influences of experts' personal experiences in fuzzy logic modeling of Atlantic salmon habitat. *North American Journal of Fisheries Management* 35(2):271-280.
- Mocq J, St-Hilaire A & Cunjak RA (2013) Assessment of Atlantic salmon (*Salmo salar*) habitat quality and its uncertainty using a multiple-expert fuzzy model applied to the Romaine River (Canada). *Ecological modelling* 265:14-25.
- Morantz D, Sweeney R, Shirvell C & Longard D (1987) Selection of microhabitat in summer by juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 44(1):120-129.
- Morrill JC, Bales RC & Conklin MH (2005) Estimating stream temperature from air temperature: implications for future water quality. *Journal of environmental engineering* 131(1):139-146.
- Mouton AM, Schneider M, Peter A, Holzer G, Müller R, Goethals PL & De Pauw N (2008) Optimisation of a fuzzy physical habitat model for spawning European grayling (*Thymallus thymallus* L.) in the Aare river (Thun, Switzerland). *ecological modelling* 215(1-3):122-132.
- Stanley JG & Danie DS (1983) Species Profiles. Life Histories and Environmental Requirements of Coastal Fishes and Invertebrates (North Atlantic). WHITE PERCH. (MAINE COOPERATIVE FISHERY RESEARCH UNIT ORONO).
- Stanley JG & Trial JG (1995) Habitat Suitability Index Models: Nonmigratory Freshwater Life Stages of Atlantic Salmon. (NATIONAL BIOLOGICAL SERVICE ANN ARBOR MI GREAT LAKES SCIENCE CENTER).
- Storebakken T & Austreng E (1987) Ration level for salmonids: I. Growth, survival, body composition, and feed conversion in Atlantic salmon fry and fingerlings. *Aquaculture* 60(3-4):189-206.
- Strakosh T, Neumann R & Jacobson R (2003) Development and assessment of habitat suitability criteria for adult brown trout in southern New England rivers. *Ecology of Freshwater Fish* 12(4):265-274.
- Symons P & Heland M (1978) Stream habitats and behavioral interactions of underyearling and yearling Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Journal of the Fisheries Board of Canada* 35(2):175-183.
- van Vliet MT, Franssen WH, Yearsley JR, Ludwig F, Haddeland I, Lettenmaier DP & Kabat P (2013) Global river discharge and water temperature under climate change. *Global Environmental Change* 23(2):450-464.
- Wilzbach MA (1985) Relative roles of food abundance and cover in determining the habitat distribution of stream-dwelling cutthroat trout (*Salmo clarki*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 42(10):1668-1672.
- Yi Y, Cheng X, Yang Z, Wieprecht S, Zhang S & Wu Y (2017) Evaluating the ecological influence of hydraulic projects: A review of aquatic habitat suitability models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68:748-762.

ANNEXE I

À noter que le document qui suit était destiné à être le document de travail des experts sélectionnés. Au fur et à mesure que le projet avançait et suite aux concertations avec les experts nous avons constaté que ce document, bien que complet, est très chargé et présente la tâche comme complexe alors qu'elle est relativement intuitive lorsqu'expliquée de vive voix. Les recommandations par rapport à ce document seraient :

- 1) de l'alléger à l'aide d'illustration montrant la démarche mentale étape par étape et en limitant le texte.
- 2) que cet outil ne devrait qu'être utilisé à titre de support visuel, puisque l'accompagnement des experts pour chaque étape reste la meilleure approche pour expliquer la logique floue.



Inclusion de la température dans un modèle
d'habitat du saumon atlantique par l'entremise de la
logique floue

Document de recensement des connaissances

Présenté par:

Joannie Beaupré

Étudiante à la maîtrise, INRS-ETE, Québec, Qc, Canada

joannie.beaupre@ete.inrs.ca

Travaux sous la supervision de:

André St-Hilaire, INRS-ETE, Québec, Qc, Canada

Normand Bergeron, INRS-ETE, Québec, Qc, Canada

Nota bene : Ce document est une adaptation reprise des travaux de Mocq (2013), préalablement rédigé par J. Mocq et A. St-Hilaire.

Il existe actuellement plusieurs modèles de l'habitat du saumon atlantique qui basent leurs prédictions à partir de variables physiques : la profondeur de l'eau, la vitesse du courant et la taille du substrat. Bien qu'ils soient communément utilisés, ceux-ci n'incluent pas, à notre connaissance, la température de l'eau. Ainsi, pour un tronçon de rivière sur lequel il existe une combinaison idéale pour la vitesse, la profondeur et le substrat, les modèles présentement en vigueur suggèrent un indice de qualité d'habitat (IQH) élevé, indépendamment de la température de l'eau. Cependant, la littérature concernant les conséquences de la température sur le fonctionnement interne et le comportement des salmonidés permet de supposer, dans les cas où cette variable atteint des valeurs en dehors des limites tolérables, que l'habitat serait de mauvaise qualité. Nous croyons, dans le contexte des changements climatiques présents et à venir et des altérations qu'ils provoqueront, que cette variable ne peut être négligée davantage dans les plans de conservations du saumon atlantique.

Dans ce présent projet, nous souhaitons améliorer un modèle généraliste en vigueur (Mocq *et al.*, 2013) par l'ajout d'une variable clé, soit la température de l'eau. Nous visons présentement le stade de tacon ($\geq 1+$) uniquement. La logique floue est utilisée pour incorporer dans le modèle, les connaissances de biologistes experts dans les préférences d'habitat. Le présent document a pour objectif la présentation succincte de la méthode de logique floue et l'acquisition des connaissances des experts.

I. INTRODUCTION À LA LOGIQUE FLOUE

La logique floue a été développée pour représenter des connaissances imprécises et incertaines en statistiques. Les ensembles flous sont des fonctions simples décrivant un degré d'appartenance d'une variable à une catégorie donnée. Ils sont utilisés avec des règles floues qui définissent la façon dont ces ensembles se combinent entre eux.

Les variables dites « linguistiques », définissent un certain nombre de catégories pour chaque variable d'habitat physique considérée (par exemple la température, la profondeur, la vitesse du courant ou la taille du substrat). Ces catégories sont définies simplement par des adjectifs du type froid/moyen/chaud ou faible/moyen/rapide, représentant chacune des plages de valeurs précises (Shepard, 2005).

La qualité de l'habitat est déterminée par des règles qui ont l'avantage d'être, dans le cadre de l'approche floue, exprimées verbalement pas le biais des variables linguistiques (exemple de règle : Si la profondeur est faible, le courant faible, le diamètre du substrat petit et la température moyenne, alors la qualité de l'habitat est moyenne). Les différentes combinaisons des variables codifient la manière humaine de penser et de communiquer.

II. CONFECTION DES SYSTÈMES FLOUS

La première étape dans la confection des systèmes flous pour l'évaluation de la qualité d'un habitat est l'acquisition des avis d'experts sur les préférences du saumon. Et vous êtes l'un de ces experts!

Les ensembles flous et les règles floues sont nos bases de travail qui nécessitent votre avis de spécialiste. Laissez-nous vous les présenter.

1. Ensembles flous

Les ensembles flous sont des fonctions simples, linéaires ou non, définissant un Degré d'Appartenance (DA) d'une plage de valeurs d'une variable à une catégorie prédéfinie. Ce DA est quantifié par une fonction d'appartenance, variant d'une valeur **0** (la valeur n'appartient pas à la catégorie) à **1** (la valeur appartient pleinement à la catégorie).

Plusieurs fonctions simples peuvent être sélectionnées par l'expert: linéaire décroissante, linéaire croissante, triangulaire ou trapézoïdale (figure A 1). Des fonctions non-linéaires, telles que des courbes exponentielles ou gaussiennes, peuvent être utilisées, mais ne le seront pas dans le présent projet. Chaque fonction est déterminée par deux à quatre paramètres qui définissent les bornes des fonctions et la vitesse de leur croissance/décroissance (voir figure A 1).

Ainsi, les étapes de la construction des fonctions d'appartenance sont :

- Le choix d'une fonction la plus adéquate pour décrire la catégorie de la variable considérée ;
- La définition des bornes de chaque ensemble flou (Limites supérieures et inférieures, début et fin du plateau pour la fonction trapézoïdale...).

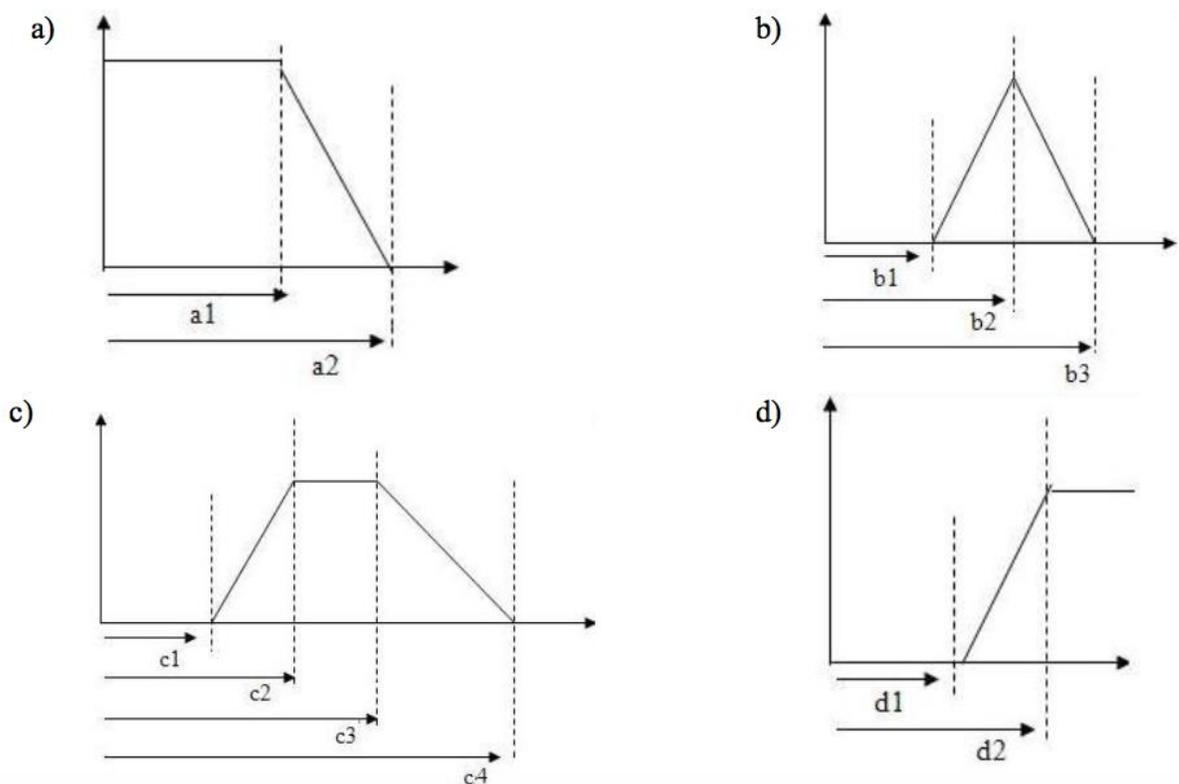


Figure A1 : Fonctions linéaire décroissante (a), triangulaire (b), trapézoïdale (c) et croissante linéaire (d), et les paramètres les définissant.

1.1 Rôle des experts

Dans le cadre de ce projet, nous nous intéressons aux préférences d'habitat du stade **tacon** du **saumon atlantique**. Pour se faire, quatre variables d'habitat physique ont été sélectionnées le **diamètre moyen du substrat** (D_s ; en mm) pour les catégories « petit », « moyen » et « grand », la **profondeur** (P ; en cm) pour les catégories « faible », « moyenne » et « profonde », la **vitesse du courant** (V ; en m/s) pour les catégories « lente », « moyenne » et « rapide », la **température de l'eau** (T ; en °C) pour les catégories « froide », « moyenne » et « chaude ».

À partir de vos expériences, vos observations et vos lectures, vous aurez à **délimiter la fonction décrivant chaque catégorie** en déterminant leurs paramètres (voir ci-après ; $a_1, a_2...$), et ce pour chaque variable (D_s, P, V et T) considérant le tacon du saumon atlantique. Enfin, vous aurez aussi à **délimiter les fonctions décrivant les catégories « pauvre », « moyen » et « élevé » de l'Indice de Qualité de l'Habitat (IQH)** du tacon pour des valeurs entre 0 et 1^7 (sur l'axe des X ; figure A 2).

⁷ Ne pas confondre avec le Degré d'Appartenance sur l'Axe Y, aussi entre 0 et 1.

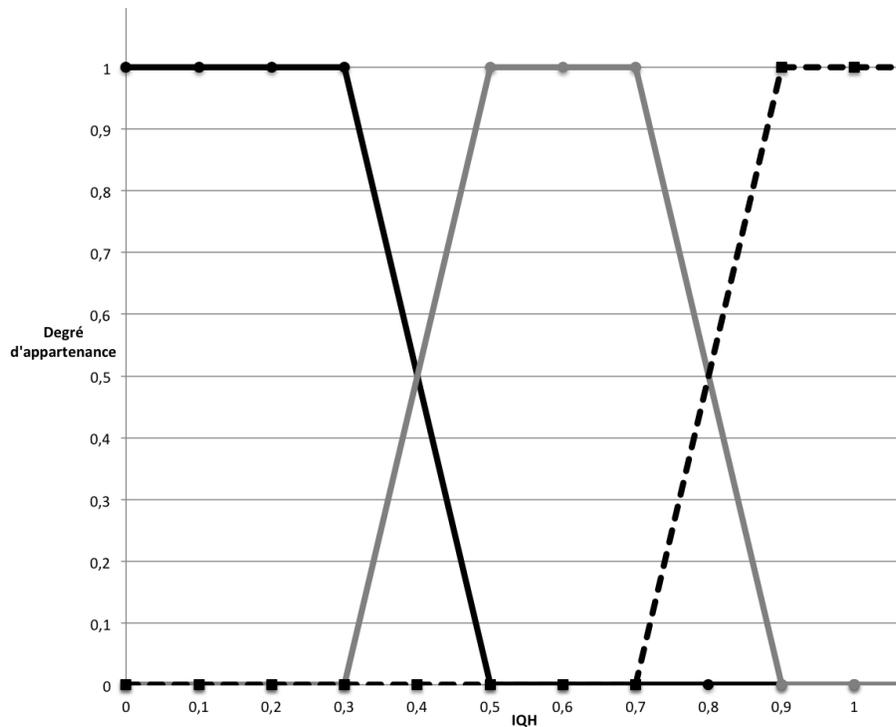


Figure A2 : Les experts auront à délimiter trois fonctions d'appartenance (« pauvre », « moyenne » et « élevée ») pour l'Indice de Qualité d'Habitat.

Marche à suivre pour remplir facilement les tableaux:

Le tableau A1 et la figure A3 illustrent un exemple fictif de préférences de température, veuillez vous y référer, au besoin, pour la section qui suit. Commençons par s'intéresser à la Température de l'eau. De par mon expérience, j'ai travaillé sur des rivières entre 8 et 25 °C, mais je sais que la rivière du Québec descend sous 0 °C et peut monter jusqu'à 30 °C⁸. Ainsi, je vais travailler avec un intervalle de valeur entre 0 et 30 °C. **Cela sera différent d'un expert à l'autre.**

Le plus facile est de commencer par la catégorie « moyenne ». Tout d'abord, il faut choisir le type de fonction.

⁸ Les valeurs utilisées pour cet exemple ont été sélectionnées de façon tout à fait arbitraire, sans fondement scientifique.

- Si nous considérons qu'une seule valeur unique et précise appartient 100 % à la catégorie « moyenne », nous opterons pour une fonction pyramidale (donnant un pic).
- Si nous considérons que dans la catégorie « moyenne », une fourchette de valeurs représentatives appartient à 100 % à cette catégorie, nous opterons pour une fonction trapézoïdale (donnant un plateau).

Dans notre exemple, nous considérerons, de notre « avis d'expert », que seule la valeur de 15 °C appartient à la catégorie « moyenne » à 100 %, **$b_2=15\text{ °C}$ (DA=1)**. Si nous avons choisi un plateau, nous aurions déterminé les bornes du plateau (c_2 et c_3), représentant la fourchette de température dont nous sommes 100 % certain de l'appartenance (DA=1) à la catégorie « Moyenne ».

La catégorie « froide » serait quant à elle, définie par une fonction linéaire décroissante. Il faut s'interroger à savoir *jusqu'à quelle valeur nous sommes certains que la température appartienne à la catégorie « froide »*. Pour donner suite à notre exemple, disons de 0 °C jusqu'à 10 °C (DA=1), **$a_1= 10\text{ °C}$** . Sachant que les fonctions sont interdépendantes, a_1 nous donne automatiquement la valeur de b_1 (ou c_1 si c'est une fonction trapézoïdale ; DA=0).

À partir de a_1 , la fonction d'appartenance de catégorie « froide » diminue alors que la fonction d'appartenance de catégorie « moyenne » commence à croître jusqu'à atteindre le « pic » en b_2 (déjà établie). À ce moment, on a la certitude que 15 °C appartient pleinement (DA=1) à la catégorie « moyenne », et qu'elle n'appartient pas du tout à la catégorie « froide » (DA=0). La somme de deux fonctions qui se chevauchent (ex. froide et moyenne), en une valeur précise est toujours égale à 1.

Tableau A1 : Exemple d'une table complétée avec les valeurs des paramètres des fonctions pour la température et de substrat

	Catégories	Paramètres de la fonction linéaire décroissante		Paramètres de la fonction triangulaire			ou	Paramètres de la fonction trapézoïdale				Paramètres de la fonction linéaire croissante	
		a1	a2	b1	b2	b3		c1	c2	c3	c4	d1	d2
Température (°C)	Froide	10	15										
	Moyenne			10	15	25							
	Chaude											15	25
Diamètre moyen du substrat (mm)	Petit	1	2										
	Moyen							1	2	3	4		
	Grand											3	4

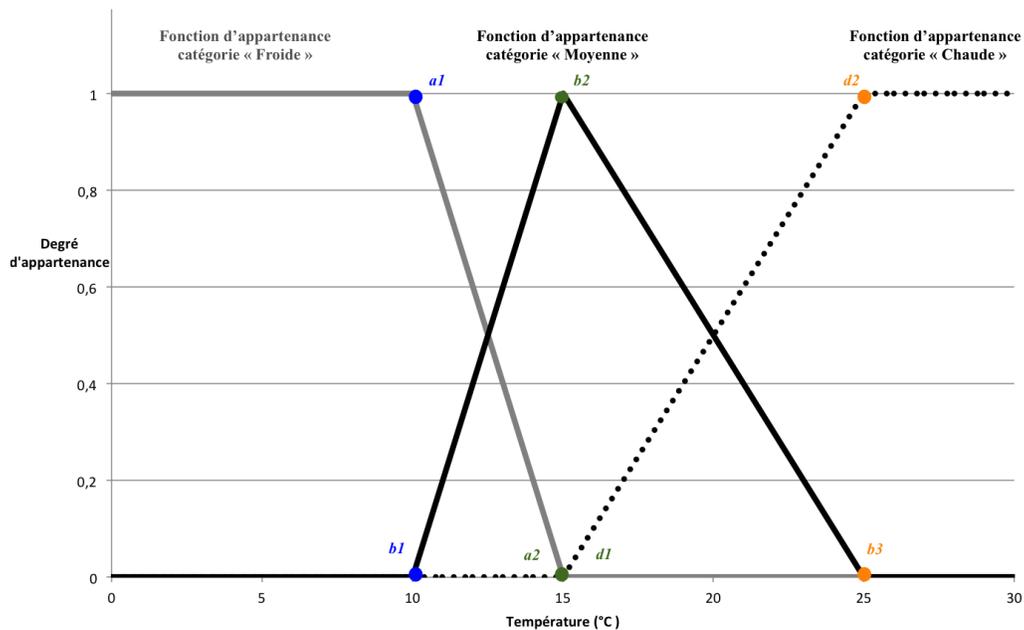


Figure A3 : Exemple de graphique issu des fonctions décrites par les paramètres de température de l'eau du tableau A 1. Pour chaque valeur individuelle de la variable (ex. 10 °C), la somme des degrés d'appartenance sera systématiquement égale à 1. En d'autres termes, lorsqu'une fonction d'appartenance atteint la valeur 1, les autres fonctions ont nécessairement la valeur 0.

Il en est de même pour la dernière catégorie, « chaude », définie par une fonction linéaire croissante (continué d'un plateau vers les valeurs extrêmes). Il faut s'interroger à savoir à *partir de quelle valeur considérons-nous la température comme étant indéniablement élevée*. Nous choisissons la valeur $d_2 = 25$ °C. Avec le jeu des interdépendances, d_2 (**da=1**) est la même valeur que b_3 (**da=0**), la limite de la fonction « chaude » (d_1 ; **DA=0**) était déjà déterminée par la valeur b_2 .

Notez qu'à la place de la fonction triangulaire de la catégorie « moyenne », une fonction trapézoïdale aurait pu tout autant être choisie, nécessitant alors quatre paramètres, $c1$, $c2$, $c3$ et $c4$, déterminant les limites de la fonction ($c1$ et $c4$) et les limites du plateau ($c2$ et $c3$) (voir tableau A 1). Le choix de la fonction est uniquement du ressort de l'expert, selon qu'il considère que telle ou telle fonction décrit au mieux l'évolution du degré d'appartenance.

Cet exercice doit être complété pour les quatre variables d'habitat physiques ainsi que pour L'IQH pour le stade tacon du saumon atlantique. Il se peut qu'en fonction de votre expérience, vous ayez de très bonnes connaissances pour les préférences d'habitat d'un stade de vie en particulier, mais moins pour les préférences des tacons ou vice versa. Remplissez l'indice de confiance dans le coin supérieur droit des tableaux A 2 et A 3: plus fort est l'indice, meilleure est votre confiance.

2. Règles floues

Les règles floues permettent la combinaison de différents ensembles de variables (Profondeur, Taille du substrat, Vitesse du courant et Température) à l'aide d'opérateurs du type SI-ALORS (IF-THEN) pour obtenir un cinquième ensemble flou (représentant l'IQH) décrivant la conséquence de la règle.

2.1 Rôle des experts

Pour le tableau A 3, nous avons besoin de vous pour estimer la catégorie d'IQH pour toutes les combinaisons possibles des catégories des quatre variables physiques. Au total, ce sont 81 règles du type SI-ALORS pour le tacon qu'il faut déterminer si l'indice de qualité de l'habitat est « pauvre », « moyen » ou « élevé ».

Par exemple, soit la règle N° 36 (tableau A 3):

SI le diamètre moyen du substrat est Moyen

ET SI la vitesse du courant est lente

ET SI la profondeur est profonde

ET SI la température est chaude

ALORS, à mon avis, l'IQH est pauvre

(Ou Moyen, ou Élevé selon votre expertise)

Règle N°	Diamètre moyen du substrat	Vitesse du courant	Profondeur	Température	IQH
36	Moyen	Lente	Profonde	Chaude	<i>pauvre</i>
37	Moyen	Moyenne	Superficielle	Froide	

Figure A4 : Règle 36 du tableau A 3 qui sera complété par les experts

Ainsi, pour chaque combinaison possible de variables, une catégorie d'IQH est déterminée, représentant la qualité de l'habitat en fonction de conditions environnementales spécifiques.

Il est possible que certaines combinaisons soient jugées aberrantes et qu'elles se retrouvent que très rarement dans la réalité, comme un substrat de taille faible dans un courant rapide. Cela n'aura pas d'influence sur la bonne marche et la justesse du modèle: ces règles ne seront simplement jamais utilisées. La principale difficulté est simplement pour vous, experts, d'imaginer une telle combinaison et la qualité d'habitat qui en résulterait.

III. EXPÉRIENCES ET REPRÉSENTATION DE L'EXPERT

Nous espérons constituer un groupe d'experts aussi large que possible. Cependant, chaque expert a une expérience qui lui est propre, déterminant une conception personnelle de la représentation d'une « rivière ». Ainsi, nous essayerons dans un second temps de voir si des expériences similaires ou très différentes conduisent à des modèles comparables ou non. Pour cela, veuillez, pour finir, répondre aux 3 courtes questions posées ci-dessous :

- De quelle(s) source(s) provient votre connaissance du saumon : littérature, travail de terrain, les deux en proportion égale?

.....

- Quelle est l'étendue géographique des rivières auxquelles vous avez pensé en faisant l'exercice?

.....

- À quel type de rivières avez-vous pensé en faisant l'exercice? (petit ruisseau, grand fleuve)

.....

- Longueur d'un tacon 1+ 2+ :

.....

Nous apprécions très sincèrement l'aide et l'investissement d'experts tels que vous, sans lesquels ce projet ne saurait aboutir. Sauf une objection de votre part, nous tiendrons à vous remercier dans les publications futures en rapport avec ce projet.

Avec tous nos remerciements.

Joannie Beaupré

André St-Hilaire

Normand Bergeron

Références:

Ahmadi-Nedushan B., St-Hilaire A., Bérubé M., Ouarda T.B.M.J. & É. Robichaud (2008) Instream flow determination using a multiple input fuzzy-based rule system: a case study, *River Research and Applications*, 24 279-292

Mocq, Julien (2013). Modélisation floue de l'habitat du saumon atlantique *Salmo salar*. Thèse. Québec, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Doctorat en sciences de l'eau, 198 p.

Mocq, Julien ; St-Hilaire, André ; Cunjak, Richard A. (2013). Assessment of Atlantic salmon (*Salmo salar*) habitat quality and its uncertainty using a multiple-expert fuzzy model applied to the Romaine River (Canada). *Ecological Modelling* , vol. 265 . p. 14-25. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2013.05.020.

Kerle F., Zollner F., Kappus B., Marx W. & J. Giesecke (2001) Fish habitat and vegetation modelling in floodplains with Casimir. CFR project report 13, IWS. University of Stuttgart.

Schneider M. & K. Jorde (2003) Fuzzy-Rule Based Models for the Evaluation of Fish Habitat Quality and Instream Flow Assessment. Proc. International IFIM Users Workshop, June 1-5, Ft. Collins, Colorado, 22 p.

Shepard R.B. (2005) *Quantifying Environmental Impact Assessments Using Fuzzy Logic*, United States of America: Springer

Tableau A2 : Paramètres délimitant les fonctions d'appartenance des valeurs de 4 variables d'habitat et de l'IQH à 3 catégories

/ 10	Catégories	Paramètres de la fonction linéaire décroissante		Paramètres de la fonction triangulaire			ou	Paramètres de la fonction trapézoïdale				Paramètres de la fonction linéaire croissante	
		<i>a1</i> 100%	<i>a2</i> 0%	<i>b1</i> 0%	<i>b2</i> 100%	<i>b3</i> 0%		<i>c1</i> 0%	<i>c2</i> 100%	<i>c3</i> 100%	<i>c4</i> 0%	<i>d1</i> 0%	<i>d2</i> 100%
Température (°C)	Froide												
	Moyenne												
	Chaude												
Diamètre moyen du substrat (mm)	Fine												
	Moyenne												
	Grossière												
Vitesse du courant (m/s)	Lente												
	Moyenne												
	Rapide												
Profondeur (mm)	Faible												
	Moyenne												
	Profonde												
Indice de Qualité d'Habitat (IQH) (Entre 0 et 1)	Pauvre												
	Moyen												
	Élevé												

Tableau A3 : Ensemble des règles floues pour le tacon du saumon atlantique

/10

Règle N°	Diamètre moyen du substrat	Vitesse du courant	Profondeur	Température	IQH
1	Petit	Lente	Faible	Froide	
2	Petit	Lente	Faible	Moyenne	
3	Petit	Lente	Faible	Chaude	
4	Petit	Lente	Moyenne	Froide	
5	Petit	Lente	Moyenne	Moyenne	
6	Petit	Lente	Moyenne	Chaude	
7	Petit	Lente	Profonde	Froide	
8	Petit	Lente	Profonde	Moyenne	
9	Petit	Lente	Profonde	Chaude	
10	Petit	Moyenne	Faible	Froide	
11	Petit	Moyenne	Faible	Moyenne	
12	Petit	Moyenne	Faible	Chaude	
13	Petit	Moyenne	Moyenne	Froide	
14	Petit	Moyenne	Moyenne	Moyenne	
15	Petit	Moyenne	Moyenne	Chaude	
16	Petit	Moyenne	Profonde	Froide	
17	Petit	Moyenne	Profonde	Moyenne	
18	Petit	Moyenne	Profonde	Chaude	
19	Petit	Rapide	Faible	Froide	
20	Petit	Rapide	Faible	Moyenne	
21	Petit	Rapide	Faible	Chaude	
22	Petit	Rapide	Moyenne	Froide	
23	Petit	Rapide	Moyenne	Moyenne	
24	Petit	Rapide	Moyenne	Chaude	
25	Petit	Rapide	Profonde	Froide	
26	Petit	Rapide	Profonde	Moyenne	
27	Petit	Rapide	Profonde	Chaude	
28	Moyen	Lente	Faible	Froide	
29	Moyen	Lente	Faible	Moyenne	
30	Moyen	Lente	Faible	Chaude	
31	Moyen	Lente	Moyenne	Froide	
32	Moyen	Lente	Moyenne	Moyenne	
33	Moyen	Lente	Moyenne	Chaude	
34	Moyen	Lente	Profonde	Froide	

Règle N°	Diamètre moyen du substrat	Vitesse du courant	Profondeur	Température	IQH
35	Moyen	Lente	Profonde	Moyenne	
36	Moyen	Lente	Profonde	Chaude	
37	Moyen	Moyenne	Faible	Froide	
38	Moyen	Moyenne	Faible	Moyenne	
39	Moyen	Moyenne	Faible	Chaude	
40	Moyen	Moyenne	Moyenne	Froide	
41	Moyen	Moyenne	Moyenne	Moyenne	
42	Moyen	Moyenne	Moyenne	Chaude	
43	Moyen	Moyenne	Profonde	Froide	
44	Moyen	Moyenne	Profonde	Moyenne	
45	Moyen	Moyenne	Profonde	Chaude	
46	Moyen	Rapide	Faible	Froide	
47	Moyen	Rapide	Faible	Moyenne	
48	Moyen	Rapide	Faible	Chaude	
49	Moyen	Rapide	Moyenne	Froide	
50	Moyen	Rapide	Moyenne	Moyenne	
51	Moyen	Rapide	Moyenne	Chaude	
52	Moyen	Rapide	Profonde	Froide	
53	Moyen	Rapide	Profonde	Moyenne	
54	Moyen	Rapide	Profonde	Chaude	
55	Grand	Lente	Faible	Froide	
56	Grand	Lente	Faible	Moyenne	
57	Grand	Lente	Faible	Chaude	
58	Grand	Lente	Moyenne	Froide	
59	Grand	Lente	Moyenne	Moyenne	
60	Grand	Lente	Moyenne	Chaude	
61	Grand	Lente	Profonde	Froide	
62	Grand	Lente	Profonde	Moyenne	
63	Grand	Lente	Profonde	Chaude	
64	Grand	Moyenne	Faible	Froide	
65	Grand	Moyenne	Faible	Moyenne	
66	Grand	Moyenne	Faible	Chaude	
67	Grand	Moyenne	Moyenne	Froide	
68	Grand	Moyenne	Moyenne	Moyenne	
69	Grand	Moyenne	Moyenne	Chaude	
70	Grand	Moyenne	Profonde	Froide	
71	Grand	Moyenne	Profonde	Moyenne	

Règle N°	Diamètre moyen du substrat	Vitesse du courant	Profondeur	Température	IQH
72	Grand	Moyen	Profonde	Chaude	
73	Grand	Rapide	Faible	Froide	
74	Grand	Rapide	Faible	Moyenne	
75	Grand	Rapide	Faible	Chaude	
76	Grand	Rapide	Moyenne	Froide	
77	Grand	Rapide	Moyenne	Moyenne	
78	Grand	Rapide	Moyenne	Chaude	
79	Grand	Rapide	Profonde	Froide	
80	Grand	Rapide	Profonde	Moyenne	
81	Grand	Rapide	Profonde	Chaude	

ANNEXE II

Les deux schémas qui suivent ont été créés à l'aide du logiciel AutoCad pour illustrer l'emplacement des thermographes à la confluence de deux tributaires avec une rivière à l'étude, soit le ruisseau de la fosse 1 et le bras des murailles (branche nord-ouest) avec la rivière Sainte-Marguerite.

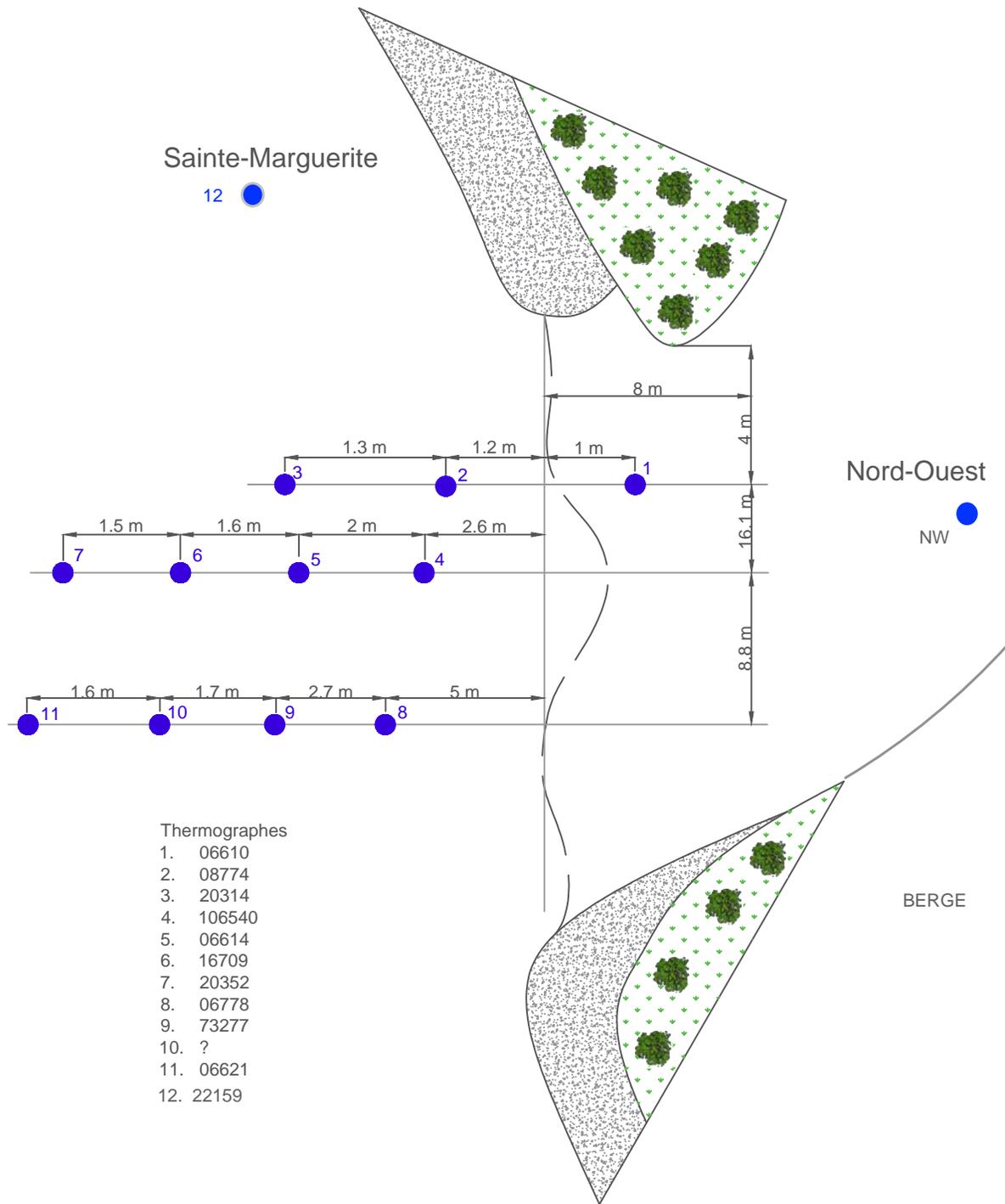


Figure A5 : Disposition du réseau de thermographes sur le site B à l'été 2017. Image créée par Ève Bilodeau avec le logiciel AutoCad ©

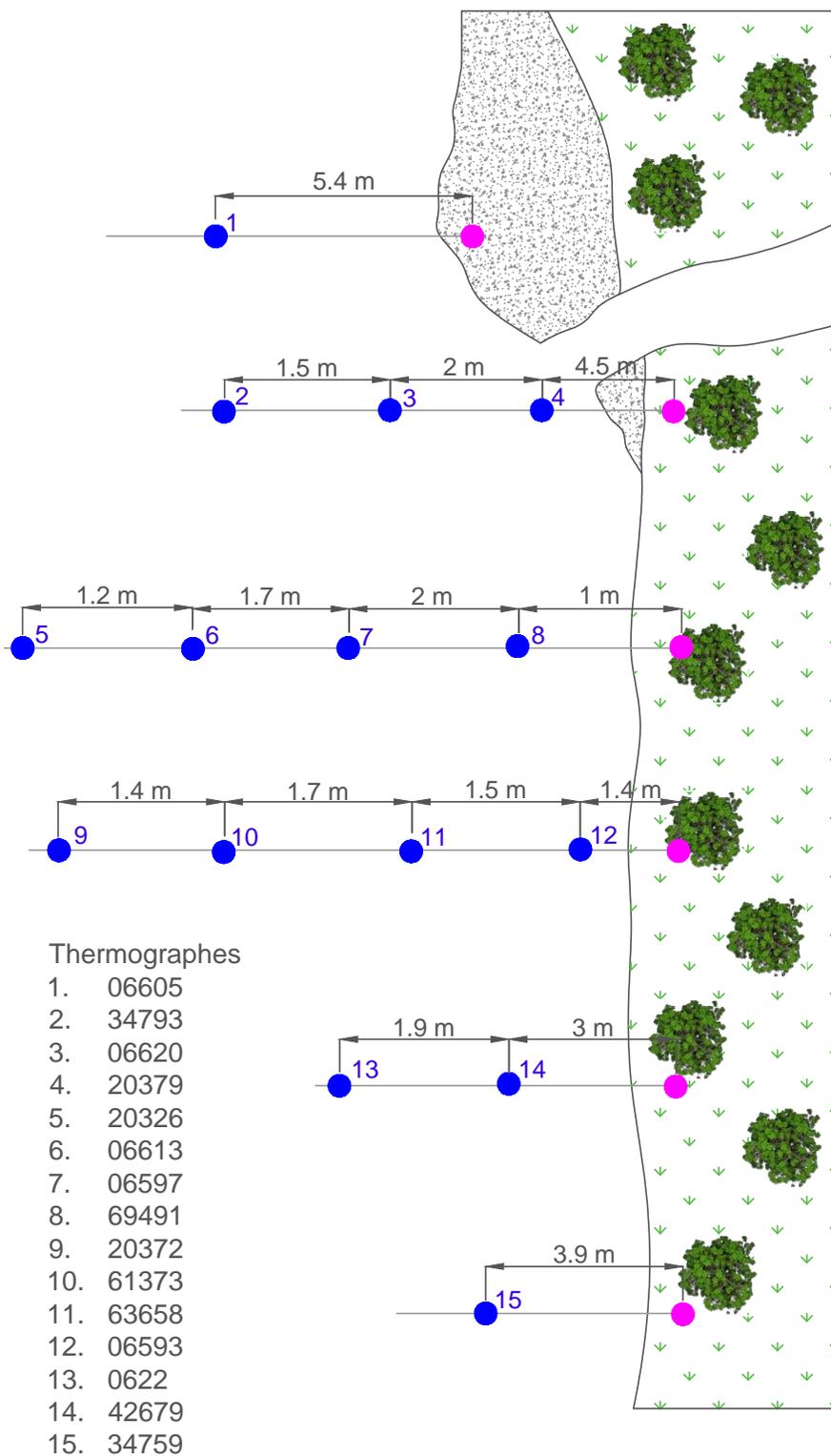


Figure A6 :Disposition du réseau de thermographes sur le site A à l'été 2017. Image créée par Ève Bilodeau avec le logiciel AutoCad ©

