Université du Québec INRS-Eau

# COMPARAISON DE DEUX APPROCHES POUR LA MODÉLISATION DES MICROHABITATS

Par Julie Lafleur Baccalauréat en génie civil

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

Jury d'évaluation

Examinateur externe

Michel Lapointe Département de géographie Université McGill

Examinateur interne

Directeur de recherche

Michel Leclerc

**INRS-Eau** 

Yves Secretan INRS-Eau

20 Août 1997

<sup>©</sup> droits réservés de Julie Lafleur, 1997

# REMERCIEMENTS

J'aimerais tout d'abord exprimer ma plus vive reconnaissance à Michel Leclerc, mon directeur de recherche, qui a rendu possible la réalisation de ce mémoire. Je le remercie pour la confiance qu'il m'a accordée, pour son optimisme tout au long de ce projet et pour ses rigoureuses directives.

Mes remerciements les plus sincères vont à Paul Boudreau qui fut une source intarissable d'information et de judicieux conseils. De plus, sa patience, sa grande disponibilité et son agréable compagnie m'ont été d'un véritable réconfort.

Ma gratitude va également à Yves Secretan et à Michel Lapointe pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce projet et pour leurs corrections constructives.

Un grand merci à Jean Morin, Bernard Doyon et tous ceux qui ont fait partie de l'équipe à un moment donné ou à un autre (je pense entre autres à Sylvie Valentin et Hervé Capra), puisqu'ils ont rendu plus qu'agréables ces années de recherche.

Enfin, je remercie très sincèrement mon père, qui m'a toujours appuyée, encouragée et aidée durant mes études, ainsi que Charlotte, pour sa joie de vivre.

# RÉSUMÉ

Le calcul de la quantité et de la qualité d'habitats piscicoles disponibles en fonction du débit permet de gérer adéquatement les ouvrages hydrauliques. Le modèle le plus répandu pour simuler les habitats, PHABSIM, utilise un simulateur hydrodynamique unidimensionnel afin de prédire les vitesses et les profondeurs à des débits autres que ceux mesurés. Les efforts de terrain et de calibration du modèle hydrodynamique sont toutefois considérables et la précision des résultats obtenus est souvent remise en question. Les cours d'eau à méandres ou contenant des îles rendent difficiles et parfois impossibles les simulations hydrodynamiques.

L'approche HABIOSIM développée à l'INRS-Eau est semblable à certains égards à celle développée dans PHABSIM mais avec une façon différente de cartographier et d'interpoler les données et elle utilise un modèle hydrodynamique bidimensionnel. Le simulateur hydrodynamique, qui est basé sur la méthode des éléments finis, utilise les équations de Saint-Venant afin de décrire l'écoulement. Tout type d'écoulement peut être simulé avec un minimum de données de terrain, du petit cours d'eau aux grands fleuves.

L'objectif du mémoire était d'établir une comparaison réaliste de ces deux approches. Les éléments de comparaison étaient les suivants : efforts de terrain requis, facilité d'utilisation des approches, calibration des modèles hydrodynamiques et versatilité des modèles. La sensibilité du résultat final à la densité et à la distribution des données ainsi qu'aux erreurs sur les vitesses produites par le modèle hydrodynamique de PHABSIM a également fait l'objet de cette étude. La comparaison a été effectuée sur un tronçon de la rivière Sainte-Marguerite (Saguenay) dans le cadre de la programmation scientifique du Centre Inter-universitaire de Recherche sur le Saumon Atlantique (CIRSA). Notre expérience avec PHABSIM rejoint la littérature, en ce qu'elle confirme la difficulté d'utilisation du modèle PHABSIM, occasionnée par la quantité de programmes qui sont inclus dans le logiciel et par les nombreuses options à l'intérieur de ces programmes. Les efforts de terrain requis pour la modéli-sation hydrodynamique 2-D sont en effet moindres et la versatilité d'utilisation d'HABIOSIM est plus grande.

Toutefois, une comparaison des valeurs d'Aires Pondérées Utiles (APU) obtenues par les deux méthodes démontre que ce résultat n'est pas très sensible à la densité des points de mesure pris en compte et à leur interpolation sur le domaine. On a obtenu des écarts entre les valeurs d'APU allant de 9% à 23%, mais ces écarts n'influenceraient pas la gestion hydrodynamique de façon significative. Ce résultat n'est pas une surprise puisque l'APU est l'intégration des indices calculés aux points de mesure et une sous-estimation ou une surestimation de l'habitat dans un secteur peut facilement être compensée ailleurs sur le tronçon. Pour cette même raison et parce que les courbes de préférence utilisées (en provenance de la rivière Moisie) ne sont pas très sélectives, la valeur d'APU totale n'est pas trop influencée par les valeurs de vitesse et de profondeur fournies par le modèle hydrodynamique de PHABSIM. Un modèle de préférence plus sélectif aurait pu conduire à des conclusions différentes.

# TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTSi
RÉSUMÉiii
LISTE DES FIGURES
LISTE DES TABLEAUXix
1. INTRODUCTION
1.1 Problématique1
1.2 Objectif général2
1.3 Stratégie utilisée2
2. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE
2.1 Introduction
2.2 Présentation des modèles
2.2.1 Modèle hydrodynamique unidimensionnel (1-D)
2.2.2 Modèle hydrodynamique bidimensionnel (2-D)14
2.2.3 Synthèse sur les modèles hydrodynamiques
2.2.4 Modèle biologique18
2.3 Objectifs spécifiques de la recherche
3. MÉTHODOLOGIE
3.1 Démarche
3.2 Description du site d'étude
3.2.1 La rivière Sainte-Marguerite (Saguenay)23
3.2.2 Choix d'un tronçon25
3.2.3 Hydrologie
3.3 Relevés de terrain
3.3.1 Relevés topographiques

3.3.2 Substrat - méthode de caractérisation	. 34
3.3.3 Station de jaugeage	. 40
3.3.4 Relation niveau-débit	40
3.3.5 Relevés de validation	42
3.4 Simulation hydrodynamique bidimensionnelle (2-D)	. 44
3.4.1 Modèle numérique de terrain	. 44
3.4.2 Calibration du modèle hydrodynamique 2-D	. 44
3.4.3 Validation	. 46
3.4.4 Simulations hydrodynamiques d'un registre hydrologique étendu	. 51
3.5 Pseudo-simulations hydrodynamiques (1-D)	. 51
3.5.1 Positionnement des noeuds de calcul utilisés dans les simulations de type PHABSIM	52
3.5.2 Extraction des données abiotiques du modèle 2-D	. 56
3.5.3 Génération d'erreurs sur les variables abiotiques produites en 1-D	. 56
3.6 Modèle d'habitat	. 59
3.6.1 Préférences d'habitat du saumon atlantique	. 59
3.6.2 Calcul de la disponibilité d'habitat	. 62
4. ANALYSE DES RÉSULTATS	. 63
4.1 Influence du mode de discrétisation de l'habitat	. 63
4.2 Analyse de sensibilité à l'incertitude des variables abiotiques	. 69
4.3 Discussion sur les méthodologies PHABSIM et HABIOSIM	. 74
4.3.1 Besoins de caractérisation du domaine étudié	. 74
4.3.2 Facilité d'utilisation des programmes et logiciels	. 76
4.3.3 Calibration des modèles hydrodynamiques	. 77
4.3.4 Versatilité des modèles hydrodynamiques	. 77
5. CONCLUSION	. 79
6. BIBLIOGRAPHIE	. 83
ANNEXE	. 87

# LISTE DES FIGURES

Figure 1 :Représentation conceptuelle d'un tronçon modélisé selon R.T. Milhous et W.J. Grenney : les valeurs de vitesse, profondeur et substrat sont considérées uniformes sur toute la surface d'une cellule
Figure 2 :Représentation des variables sur un élément T-6
Figure 3 :Illustration de l'élément T-3 utilisé dans le calcul des aires pondérées utiles21
Figure 4 :Schéma des principales étapes de la méthodologie utilisée pour comparer les approches PHABSIM et HABIOSIM
Figure 5 :Plan de localisation du tronçon à l'étude sur la branche principale de la rivière Sainte-Marguerite (d'après un plan de Solivar, 1991)27
Figure 6 :Localisation précise du tronçon à l'étude sur la rivière Sainte-Marguerite (d'après un plan de Solivar, 1991)28
Figure 7 :Tronçon à l'étude de la rivière Sainte-Marguerite : points de mesures topographiques et localisation des repères géodésiques
Figure 8 :Carte des zones homogènes de substrat sur le tronçon de la rivière Sainte- Marguerite retenu. (voir définition des zones de substrat au tableau 6)
Figure 9 :Relation niveau-débit à l'aval du tronçon à l'étude42
Figure 10 :Rivière Sainte-Marguerite : localisation des points de mesure des vitesses et de la section de jaugeage au débit de 7,4 m <sup>3</sup> /s le 20 juillet 199543
Figure 11 :Rivière Sainte-Marguerite : localisation des points de mesure des vitesses et de la section de jaugeage au débit de 19,2 m <sup>3</sup> /s le 8 novembre 199543
Figure 12 :Tronçon à l'étude de la rivière Sainte-Marguerite : modèle numérique de terrain (MNT) réalisé avec le logiciel MODELEUR (8276 noeuds, 3885 éléments)45
Figure 13 :Carte des transects retenus pour la représentation unidimensionnelle du tronçon et topographie du modèle numérique d'élévation 2-D (niveau géodésique)54
Figure 14 :Carte des cellules qui sous-tendent la topologie PHABSIM sur le tronçon de la rivière Sainte-Marguerite
Figure 15 :Courbe de préférence d'habitat des alevins du saumon atlantique de la rivière Moisie en fonction de la vitesse (d'après Boudreau <i>et al.</i> 1989)60

Figure 16 :Courbe de préférence d'habitat des alevins du saumon atlantique de la rivière Moisie en fonction de la profondeur (d'après Boudreau <i>et al.</i> 1989)
Figure 17 :Carte des surfaces d'habitats disponibles pour l'alevin à 35 m <sup>3</sup> /s selon PHABSIM sur le tronçon de la rivière Sainte-Marguerite
Figure 18 :Carte des surfaces d'habitats disponibles pour l'alevin à 35 m <sup>3</sup> /s selon HABIOSIM sur le tronçon de la rivière Sainte-Marguerite
Figure 19 : Courbes des APU en fonction du débit selon PHABSIM et HABIOSIM 68
Figure 20 :Surface présente dans chacune des classes d'indice pour les simulations avec HABIOSIM de 19 m <sup>3</sup> /s, 35 m <sup>3</sup> /s et 43 m <sup>3</sup> /s
Figure 21 :Comparaison des surfaces présentes dans chaque classe d'indice pour PHABSIM et HABIOSIM à un débit de 35 m <sup>3</sup> /s
Figure 22 :Courbes des APU (valeur moyenne) en fonction du débit pour les quatre simulations d'erreurs sur les vitesses aux noeuds de PHABSIM. L'écart-type de l'erreur sur la profondeur est toujours égal à 10%
Figure 23 :Courbe de la valeur moyenne d'APU en fonction du débit pour une erreur sur les vitesses de 30%. La barre d'erreur pour chaque valeur indique la valeur minimum et maximum de l'échantillon de valeurs d'APU simulées
Figure 24 :Répartition des APU calculées au débit de 7 m <sup>3</sup> /s pour trois écarts-types sur l'erreur des vitesses selon PHABSIM
Figure 25 :Carte des isosurfaces de profondeur aux 0,25 mètre pour un débit de 7 m <sup>3</sup> /s sur le tronçon à l'étude de la rivière Sainte-Marguerite
Figure 26 :Carte des isosurfaces de vitesse aux 0,10 m/s pour un débit de 7 m <sup>3</sup> /s sur le tronçon à l'étude de la rivière Sainte-Marguerite
Figure 27 : Carte des isosurfaces de profondeur aux 0,25 mètre pour un débit de 25 m³/s sur le tronçon à l'étude de la rivière Sainte-Marguerite
Figure 28 : Carte des isosurfaces de vitesse aux 0,25 m/s pour un débit de 25 m <sup>3</sup> /s sur le tronçon à l'étude de la rivière Sainte-Marguerite
Figure 29 : Carte des isosurfaces de profondeur aux 0,25 mètre pour un débit de 100 m <sup>3</sup> /s sur le tronçon à l'étude de la rivière Sainte-Marguerite
Figure 30 : Carte des isosurfaces de vitesse aux 0,25 m/s pour un débit de 100 m <sup>3</sup> /s sur le tronçon à l'étude de la rivière Sainte-Marguerite

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Présentation d'un tableau résumant les principales caractéristiques des modèles hydrodynamiques utilisés dans PHABSIM et HABIOSIM
Tableau 2 :Statistiques des débits d'étiage sur le tronçon à l'étude
Tableau 3 :Statistiques des débits de crue sur le tronçon à l'étude
Tableau 4 :Classes de substrat utilisées pour définir les assemblages granulométriques         (C.K. Wentworth)
Tableau 5 : Utilisation des différents paramètres du substrat selon le contexte
Tableau 6 : Caractéristiques des différents groupes de substrats
Tableau 7 : Résultats des jaugeages sur le tronçon à l'étude40
Tableau 8 : Conditions aux limites ayant servi à la validation du modèle hydrodynamique47
Tableau 9 : Présentation des résultats de la validation pour le débit de 7 m <sup>3</sup> /s48
Tableau 10 : Présentation des résultats de la validation pour le débit de 19 m <sup>3</sup> /s50
Tableau 11 :Système de classification du substrat pour l'alevin du saumon atlantique de la rivière Ashuapmushuan : valeurs des sous-indices s <sub>i</sub> (d'après Leclerc <i>et al.</i> 1995)
Tableau 12 :Statistiques sur les valeurs d'APU calculées à partir des simulations d'erreurs sur les vitesses : écart-type de 30%
Tableau 13 :Statistiques sur les valeurs d'APU calculées à partir des simulations d'erreurssur les vitesses : écart-type de 50%
Tableau 14 :Statistiques sur les valeurs d'APU calculées à partir des simulations d'erreurs sur les vitesses : écart-type de 70%
Tableau 15 :Statistiques sur les valeurs d'APU calculées à partir des simulations d'erreurs sur les vitesses : écart-type de 100%
Tableau 16 :Besoins de caractérisation pour PHABSIM et HABIOSIM

## 1.1 Problématique

Les cours d'eau en Amérique du nord sont nombreux. Cette richesse sert à des fins multiples, telles que l'irrigation, l'hydroélectricité, l'alimentation en eau potable, le rejet des eaux usées, la navigation, la récréation, la pêche etc... Un abus d'utilisation de cette ressource durant la période de croissance démographique et industrielle qui a suivi la deuxième guerre mondiale a eu comme conséquence de détruire l'équilibre naturel de plusieurs rivières et de mettre en péril la faune et la flore de ses écosystèmes. Il a fallu la disparition de populations piscicoles dans certains cours d'eau pour que la population soit alertée sur la dégradation extrême de cette ressource. Des études sur les cours d'eau menacés ont permis de conclure que la première cause de disparition des poissons était le manque d'habitats et que la quantité et la qualité de ces habitats étaient étroitement liés au débit du milieu.

Des efforts de recherche dans le domaine des habitats piscicoles ont conduit à une meilleure compréhension de la relation habitat/débit. Plusieurs modèles ont été développés afin de déterminer la relation entre les habitats disponibles et le débit. Parmi ceux-ci, PHABSIM (Physical HABitat SIMulation), un programme de modélisation des microhabitats développée aux États-Unis (Bovee 1982), est le plus utilisé à travers le monde. Il s'agit d'un simulateur hydrodynamique unidimensionnel combiné à un modèle biologique dont le résultat exprime la surface du domaine utilisable comme habitat piscicole. L'INRS-Eau a développé une variante de cette méthode, HABIOSIM. L'ajout principal dans cette méthode est un simulateur hydrodynamique bidimensionnel basé sur la méthode des éléments finis.

# 1.2 Objectif général

L'objectif principal de cette étude est de comparer les modèles PHABSIM et HABIOSIM, tant au niveau de l'effort de terrain requis et de la facilité de calibration des modèles hydrodynamiques qu'au niveau de la qualité des résultats obtenus.

### 1.3 Stratégie utilisée

Une étude utilisant HABIOSIM a d'abord été réalisée sur un tronçon de la rivière Sainte-Marguerite (Saguenay). Ceci impliquait la cueillette des données nécessaires à une simulation hydrodynamique bidimensionnelle : une carte détaillée de la topographie du tronçon, une carte descriptive des zones de substrat, quelques mesures de vitesse pour la calibration du modèle, et une relation niveau-débit à l'aval du tronçon. Après la construction d'un modèle numérique de terrain et sa calibration pour les simulations hydrodynamiques, les vitesses et les niveaux ont été simulés à un registre représentatif de l'hydrologie de la rivière et les valeurs d'aires pondérées utiles (APU) sur le tronçon ont été calculées à chaque débit.

Parallèlement à l'étude hydrodynamique bidimensionnelle, une étude unidimensionnelle PHABSIM a été entreprise. Plutôt que de récolter directement les valeurs de profondeur, vitesse et substrat sur le terrain, ce qui aurait conduit à accomplir deux fois la même campagne selon un protocole différent, cette information a été soit reprise et adaptée du modèle de terrain 2-D ou extraite des résultats de la calibration du modèle hydrodynamique bidimensionnel aux deux débits de calibration. Cette approche revenait à substituer le modèle 2-D à la réalité du terrain et d'y extraire les données requises en vue de construire le modèle de terrain 1-D. Suite à des difficultés de calibration des programmes de PHABSIM à partir de ces valeurs, les données de vitesse et de profondeur ont été extraites des résultats des simulations hydrodynamiques bidimensionnelles pour tout le registre des débits simulés. Un bruit sur les profondeurs et les vitesses a été ajouté aux résultats bidimensionnels afin de tester la sensibilité des APU aux erreurs sur les vitesses ou les profondeurs produites par le modèle hydrodynamique. L'APU du tronçon a été calculée pour chaque scénario. Finalement, plusieurs éléments de comparaison ont été traités afin de montrer clairement les différentes caractéristiques de chaque modèle étudié.

# 2.1 Introduction

Il existe plusieurs outils pour évaluer la capacité d'accueil d'un cours d'eau en fonction du débit. Déjà quelques revues des méthodes disponibles ont été réalisées (Stalnaker and Arnette 1976; Wesche and Rechard 1980; Morhardt 1986). Parmi les méthodes disponibles, plusieurs se sont inspirées de l'approche IFIM (Instream Flow Incremental Methodology) (Bovee and Milhous, 1978) développée par le groupe IFG (Instream Flow Group) faisant parti de l'US Fish and Wildlife Service. Cette méthode de résolution, décrite en détail par Bovee (1982), vise à connaître l'impact d'un changement du débit sur la morphologie de la rivière, la qualité de l'eau, la température de l'eau ainsi que sur les microhabitats disponibles (Jowett 1992). La notion de microhabitat fait référence ici aux conditions morphodynamiques au nez du poisson alors que le macrohabitat correspond aux caractéristiques longitudinales de la rivière comme la température ou la qualité de l'eau (Bovee 1982). L'approche IFIM s'est fait connaître à travers le monde par le programme PHABSIM (Physical HABitat SIMulation), sa principale composante, qui permet de prédire la quantité et la qualité des habitats piscicoles d'un cours d'eau en fonction de différents paramètres hydrodynamiques (Milhous 1989). Il s'agit d'un modèle biologique, couplé à un simulateur des conditions hydrodynamiques, dont le résultat est une évaluation des habitats piscicoles disponibles.

Le modèle biologique utilisé dans PHABSIM est inspiré de Waters (1976). L'hypothèse de Waters est que le poisson affiche des préférences pour une certaine gamme de valeurs de différentes variables physiques, tels que la profondeur d'eau, la vitesse du courant et le substrat (granulats). Ces valeurs de vitesse, profondeur et substrat sont converties en indices de préférence pour chaque variable qui sont ensuite intégrés sur la surface du domaine pour donner une valeur d'APU (Aire Pondérée Utile) au tronçon étudié. La valeur d'APU

est un indicateur de la quantité et de la qualité d'habitats disponibles pour une espèce donnée.

Le simulateur hydrodynamique utilisé dans PHABSIM est un modèle hydrodynamique unidimensionnel dont les équations de base sont depuis longtemps acceptées par les hydrauliciens (Chow 1959). Les trois principaux programmes sont WSP (Water Surface Profile) utilisant la méthode des courbes de remous, IFG-4 qui se base plutôt sur des relations empiriques entre le niveau et le débit et MANSQ qui utilise l'équation de Manning. Ces programmes sont présentés plus en détail à la section suivante.

En dépit du fait que PHABSIM soit la méthode la plus couramment utilisée partout au monde pour régler les conflits de gestion hydraulique, on retrouve plusieurs études mettant en doute le choix et l'indépendance des variables physiques (Morhardt 1986; Scott and Shirvell 1987; Shirvell 1989; Souchon *et al.* 1989), la relation positive entre les APU et la biomasse (Mathur *et al.* 1985), la reproductibilité des résultats obtenus avec différents modèles biologiques (Gan and McMahon 1990) et la validité des résultats hydrodynamiques (Osborne *et al.* 1988; Ghanem 1994).

Malgré l'importance de la validité des résultats hydrodynamiques, peu d'études traitent de ce sujet (Morhardt 1986). Ce dernier mentionne trois auteurs qui ont comparé les résultats des variables hydrodynamiques (Butler 1979) ou des APU (Hilgert 1982 ; Nehring 1979), obtenus par des simulateurs hydrodynamiques différents. Pour deux de ces auteurs, les programmes comparés étaient IFG-4 et WSP, tandis que pour le troisième auteur (Nehring 1979), les programmes comparés étaient IFG-4 et R2Cross. Dans ces trois tests, la différence entre les résultats obtenus par les deux modèles était marquée mais malheureusement, les études ne révèlent pas quels résultats sont justes. Une autre étude traite également de la validité des résultats hydrodynamiques simulés avec WSP dans les rivières à faible gradient (Osborne 1988). Osborne compare les vitesses et les profondeurs, à l'échelle de la cellule, aux valeurs mesurées sur le terrain. De plus, il compare la différence entre le résultat en APU calculé à partir des résultats hydrodynamiques mesurés et simulés. Sa conclusion est

7

que le programme WSP ne simule pas de façon précise les conditions d'habitat à cause de la difficulté de calibrer le modèle. Il prétend qu'au mieux le modèle est difficile à calibrer, même dans les canaux uniformes. Finalement, il mentionne que plusieurs mesures de terrain à plusieurs débits différents sont nécessaires afin de simuler un registre de débit assez large. Osborne mentionne aussi l'étude de Elser (1976) sur la précision des résultats obtenus par WSP. Ce dernier conclut dans son étude que le modèle simule les niveaux d'eau de façon satisfaisante mais que les erreurs sur les prédictions des vitesses moyennes sur une section transversale vont de 66% à 150% par rapport aux valeurs mesurées.

Afin d'améliorer les résultats hydrodynamiques, certains hydrauliciens ont proposé l'utilisation d'un modèle hydrodynamique bidimensionnel basé sur la méthode des éléments finis (Leclerc *et al.* 1991, 1994, 1995 ; Ghanem *et al.* 1994; Waddle *et al.* 1996 ; Boudreau *et al.* 1996 ; Bourgeois *et al.* 1996). Dans l'étude de Waddle *et al.* (1996), des simulations hydrodynamiques unidimensionnelles et bidimensionnelles ont été réalisées parallèlement, à partir de données de terrain distinctes mais sur un même tronçon. Suite aux résultats hydrodynamiques obtenus, leur conclusion est que les deux modèles produisent des résultats satisfaisants lorsque le comportement hydrodynamique de la rivière est unidimensionnel, c'est à dire que les méandres ne sont pas trop prononcés et qu'il n'y a pas de courants convergents ou divergents. Par ailleurs, pour des résultats similaires, il prétend que la calibration est moins ardue avec le modèle bidimensionnel.

Bien que les résultats obtenus par le modèle hydrodynamique bidimensionnel soient concluants, les usagers de PHABSIM sont très réticents face à cette nouvelle technologie puisque plusieurs ont déjà investi beaucoup de temps et d'argent pour se familiariser avec PHABSIM. C'est pourquoi plusieurs essais de validation sont en cours (Waddle *et al.* 1996) afin de déterminer si le gain de précision rend nécessaire ce nouvel investissement. Ce travail vient s'inscrire dans cette série d'études. La section qui suit est un bref exposé des principales caractéristiques des modèles utilisés : le modèle hydrodynamique unidimensionnel utilisé dans PHABSIM, le modèle hydrodynamique bidimensionnel utilisé dans HABIOSIM (Leclerc *et al.* 1995) et certains principes à la base du modèle biologique.

## 2.2 Présentation des modèles

La méthode de modélisation des microhabitats telle que développée par le groupe US Fish and Wildlife Service et utilisée dans leur programme de calcul PHABSIM, consiste en un couplage de deux modèles, physique et biologique. Le modèle physique sert à simuler les conditions hydrodynamiques à différents débits à partir d'une ou de plusieurs campagnes de terrain. Le modèle biologique traduit les relations entre la présence ou la densité relative d'un stade donné d'une espèce de poisson et les valeurs des variables physiques prises en compte dans le modèle hydrodynamique. Le couplage des deux modèles fournit une évaluation de la capacité d'accueil potentielle pour le poisson en fonction du débit. La quantité d'habitats disponibles est exprimée sous la forme d'Aires Pondérées Utiles (APU). L'APU résulte de la pondération de la surface étudiée par un indice qui traduit la préférence du poisson pour les valeurs des variables physiques présents sur le site.

Les sections qui suivent présentent les principes de base des modèles hydrodynamiques utilisés dans PHABSIM et HABIOSIM, un tableau synthèse de ces modèles ainsi qu'une brève description du modèle biologique et du calcul des APU.

#### 2.2.1 Modèle hydrodynamique unidimensionnel (1-D)

La méthode de simulation hydrodynamique utilisée dans PHABSIM permet de calculer le profil de la surface libre pour les écoulements permanents graduellement variés en plus de simuler les vitesses à différents débits. La simulation des niveaux d'eau est unidimensionnelle puisqu'une même valeur est attribuée sur toute la largeur de la rivière et que seul le profil longitudinal de la ligne d'eau est adressé. La simulation des vitesses pourrait être considérée comme étant bidimensionnelle puisque, une fois la vitesse moyenne obtenue sur une section, un profil transversal est calculé sur la base d'une redistribution des vitesses, le décrivant ainsi dans ses deux dimensions, longitudinale et transversale. Par contre, l'orientation de cette vitesse simulée est supposée perpendiculaire à la section transversale restreignant ainsi l'écoulement à une direction. Pour cette raison, on ne peut considérer que la simulation des vitesses est bidimensionnelle et on dira plutôt que c'est soit du faux 2-D ou du 1-D et demi. Cette approche, si elle conserve le débit, ne permet pas de respecter explicitement la conservation de la quantité de mouvement.

Pour effectuer une simulation hydrodynamique avec les programmes proposés par PHAB-SIM, il faut procéder en deux étapes: la première étape consiste à établir des relations entre le niveau de la surface d'eau et le débit pour chaque section transversale à l'étude. Il existe trois programmes dans PHABSIM pouvant élaborer des relations niveau-débit. Le programme IFG-4 qui développe des relations empiriques du niveau en fonction du débit pour chaque section transversale de façon indépendante, le programme MANSQ qui utilise l'équation de Manning en considérant également chaque section comme étant indépendante des autres et le programme WSP qui utilise la méthode des courbes de remous mettant en relation chaque section en leur faisant subir l'influence de la section en aval. Dans la plupart des cours d'eau, une combinaison des trois programmes est utilisée pour simuler tout le registre de débits. La deuxième étape pour la simulation hydrodynamique dans PHABSIM est de prédire la distribution transversale des vitesses sur chaque section. Le programme alors utilisé est le programme IFG-4. Les équations à la base de chacun de ces différents programmes sont présentées dans les sections suivantes, à commencer par la partition du tronçon à l'étude pour fins de calcul par section.

#### 2.2.1.1 Discrétisation du domaine d'écoulement

Le domaine d'écoulement à l'étude est divisé longitudinalement par des sections transversales, aussi appelées transects, positionnées au centre de chaque secteur hydrauliquement homogène et présentant simultanément un intérêt pour l'habitat. Il est important d'avoir suffisamment de sections transversales pour bien capter les changements abrupts de la morphologie du lit de la rivière. Par ailleurs, il n'y a pas de gain de précision significatif lorsque le nombre de transects dépasse un certain optimum déterminé par la topographie du tronçon à l'étude (Tarbet and Hardy 1996). Ce qui est important, ce n'est pas la quantité de sections transversales sur le tronçon, mais un bon choix quant à leur emplacement (Bourgeois *et al.* 1996).

Sur chacune de ces sections, des mesures de vitesse, de profondeur et de substrat sont prises pour caractériser les changements latéraux. Habituellement la topographie transversale varie plus rapidement que la topographie longitudinale, donc, l'espacement latéral entre les points est généralement plus faible (une moyenne de 20 points de mesure par section) que l'espacement entre les sections transversales. Chaque point de mesure caractérise une cellule (figure 1) et la cellule portera une valeur constante pour chaque variable à un débit donné. Les limites de la cellule sont déterminées par la distance entre les transects et l'espacement entre les points de mesure. Pour chaque point de mesure, l'information requise est la suivante :

- La topographie, c'est à dire les coordonnées x,y,z du lit
- Une vitesse moyenne sur la colonne d'eau
- Le niveau d'eau
- Une évaluation locale du substrat

Idéalement, ces mesures doivent être effectuées à un même débit pour tout le domaine. Comme le débit tend à fluctuer d'une journée à l'autre, les mesures pour chaque transect ne correspondent pas nécessairement au même débit et il faut donc tenir compte de ces modifications lors des simulations de calibration du modèle. Pour les besoins de calibration, il est recommandé d'effectuer trois campagnes de terrain à des débits qui couvrent le mieux possible le registre des débits à simuler.



### Figure 1 :Représentation conceptuelle d'un tronçon modélisé selon R.T. Milhous et W.J. Grenney : les valeurs de vitesse, profondeur et substrat sont considérées uniformes sur toute la surface d'une cellule

### 2.2.1.2 Programme IFG-4

Le programme IFG-4 peut être utilisé pour le calcul du niveau d'eau, particulièrement pour les débits faibles, et la détermination de la distribution des vitesses sur la section transversale.

#### Évaluation de la relation niveau-débit

Les deux principes à la base du modèle IFG-4 pour le calcul du niveau d'eau sont l'indépendance entre les sections et l'existence d'une relation empirique entre le niveau d'eau et le débit. Cette relation est présentée sous forme logarithmique dans l'équation suivante :

(1) 
$$Log(WSL - SZF) = Log(a) + b * Log(Q)$$

où,

 $Q = d\acute{e}bit (m^3/s)$ 

WSL = élévation de la surface d'eau (m), (Water surface level)

SZF = élévation de la surface à un débit nul (m), (Surface at zero flow)

a,b = constantes de calibration locales

En connaissant au moins trois doublets (Q, WSL) dans l'espace logarithmique, il est possible d'évaluer les constantes a et b par une régression linéaire simple sur chaque transect. C'est cette relation qui sera utilisée pour l'évaluation locale des niveaux d'eau à différents débits. Il est important de noter que plus le nombre de couples (Q, WSL) disponibles sera élevé, plus la relation empirique développée sera rigoureuse. Une erreur maximum de 10% entre WSL mesuré et WSL calculé par l'équation 1 est jugée acceptable.

### Évaluation de la distribution des vitesses

Dans IFG-4, il existe deux approches différentes pour simuler les vitesses selon qu'on ait une ou plusieurs vitesses de calibration. Avec un minimum de trois ensembles de vitesses, on peut établir une relation empirique entre le débit et la vitesse à chaque point de mesure (cellule). Cette méthode suppose qu'il existe une relation log-log linéaire entre la vitesse à chaque point et le débit. Par ailleurs, si on ne possède qu'un seul ensemble de vitesses, on utilisera plutôt une approche visant à utiliser ces vitesses pour déterminer la distribution du n de Manning sur la section transversale à l'aide de l'équation suivante :

(2) 
$$n_i = \left[1 * S^{\frac{\gamma_i}{2}} * d_i^{\frac{\gamma_i}{2}}\right] / v_i$$

où,

 $n_i$  = constante de Manning pour le point *i* 

S = pente de la surface libre

 $d_i$  = profondeur au point *i* (m)

$$v_i$$
 = vitesse au point *i* (m)

Pour simuler les vitesses aux autres débits, l'équation utilisée est la suivante :

12

(3) 
$$v_i = \left(\frac{1}{n_i}\right) d_i^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$$

Le « n » de Manning est gardé constant pour l'intervalle des débits simulés. Une vérification de la validité des vitesses simulées est effectuée en comparant le débit calculé à partir des vitesses simulées au débit que l'on veut simuler. Les vitesses sont augmentées ou réduites par un coefficient commun jusqu'à ce que le débit calculé corresponde au débit fourni par l'utilisateur.

#### 2.2.1.3 Programme MANSQ

Le modèle MANSQ suppose également que les sections transversales sont indépendantes les unes des autres. Le niveau de la surface de l'eau est évalué à l'aide de l'équation de Manning. Le programme MANSQ performe mieux lorsque le débit est élevé. Pour calibrer le modèle, il est nécessaire de connaître au moins un doublet (Q, WSL) pour chaque transect. L'équation de Manning utilisée est la suivante :

$$(4) Q = \frac{1}{n} A R^{\frac{1}{2}} S^{\frac{1}{2}}$$

où,

$$Q = d\acute{e}bit (m^3/s)$$

A = aire de la section (m<sup>2</sup>)

R = rayon hydraulique (m)

S = pente d'énergie

$$n = \text{coefficient de rugosité}$$

Le programme MANSQ est couramment utilisé pour des débits élevés lorsque ce ne sont pas les sections qui contrôlent les conditions hydrodynamiques, c'est à dire lorsque l'écoulement n'est pas critique.

#### 2.2.1.4 Programme WSP

Le modèle WSP (Water Surface Profile) utilise la méthode des courbes de remous (standard step backwater) pour calculer le profil longitudinal de l'élévation de la surface de l'eau en régime fluvial. Des vitesses sont également calculées et peuvent être utilisées dans le cas où des mesures de vitesse ne seraient pas disponibles pour la calibration de IFG4. Contrairement aux deux autres modèles, les sections transversales ne sont pas indépendantes les unes des autres. Le modèle WSP détermine la perte d'énergie entre deux sections consécutives (de l'amont vers l'aval) en utilisant l'équation de Manning. Il est nécessaire que la section à l'aval du tronçon soit une section de contrôle hydraulique, ou que sa relation niveau-débit soit connue.

### 2.2.2 Modèle hydrodynamique bidimensionnel (2-D)

Le modèle hydrodynamique bidimensionnel utilisé jusqu'à maintenant dans HABIOSIM est appelé MEFLU. Il résout les équations de Saint-Venant (Leclerc *et al.* 1987, 1990) en utilisant comme grille de calcul la méthode des éléments finis (Dhatt et Touzot 1981). Ces équations décrivent les écoulements en respectant des principes de conservation de la masse et de la quantité de mouvement tout en tenant compte des assemblages granulométriques présents sur le tronçon à l'étude. L'atout principal de ce modèle est sa capacité de déterminer par lui-même la position du littoral du cours d'eau en fonction du débit (modèle à bancs couvrant-découvrant). Cette caractéristique est particulièrement utile sur des milieux à frontière mobile (estuaires à marée, rivières, fleuves) dont le régime hydrologique peut faire varier significativement l'aire mouillée par l'écoulement.

#### 2.2.2.1 Équations de conservation

Les équations à la base du modèle hydrodynamique bidimensionnel utilisent une forme dite non-conservative où les variables d'état primitives de l'écoulement sont les vitesses intégrées verticalement sur la colonne d'eau et le niveau d'eau. Conservation de la masse

(5) 
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Hu}{\partial x} + \frac{\partial Hv}{\partial y} = 0$$

Conservation de la quantité de mouvement

(6) 
$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + g\frac{\partial h}{\partial x} = F_x$$

(7) 
$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} = F_y$$

(8) 
$$F_x = -\frac{gn^2|V|u}{H^{\frac{4}{3}}} + \frac{c_w\rho_a w_x|W|}{\rho H} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + f_c v$$

(9) 
$$F_{y} = -\frac{gn^{2}|V|v}{H^{\frac{4}{3}}} + \frac{c_{w}\rho_{a}w_{y}|W|}{\rho H} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial\tau_{yx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial\tau_{yy}}{\partial y} - f_{c}u$$

Les contraintes de Reynolds  $\tau_{ij}$  sont définies comme suit (en utilisant la notation d'Einstein):

(10) 
$$\frac{\tau_{ij}}{\rho} = v_i \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad i = 1, 2 \text{ et } j = 1, 2$$

où,

$$v_t$$
 = viscosité turbulente cinématique

n = coefficient de Manning

$$f_c$$
 = facteur de Coriolis

$$H$$
 = profondeur totale

$$h$$
 = niveau de surface

u, v = composantes de la vitesse de l'eau

V = module de la vitesse de l'eau

 $w_x, w_y$  = composantes de la vitesse du vent

$$W$$
 = module de la vitesse du vent

16	Comparaison de deux approches pour la modélisation des microhabitats
ρ	= masse volumique de l'eau
$ ho_{a}$	= masse spécifique de l'air
<i>x</i> , <i>y</i>	= coordonnées cartésiennes
C <sub>w</sub>	= coefficient de traînée du vent

#### 2.2.2.2 Discrétisation par éléments finis

La discrétisation du tronçon consiste à subdiviser celui-ci en éléments triangulaires dont la taille peut être ajustée pour bien représenter la topographie et les variations du substrat. La taille des mailles peut également être raffinée dans un secteur où plus de précision est désirée soit pour des raisons hydrodynamiques ou biologiques. Dans l'approche de Leclerc et al. chacun des éléments possède six noeuds (T-6) (figure 2). Les vitesses sont approximées quadratiquement sur les six noeuds tandis que les niveaux d'eau et les profondeurs le sont linéairement entre les noeuds-sommet. Une valeur constante sur l'élément est attribuée au substrat, et aux macrophytes le cas échéant. Les équations de conservation décrites à la section 2.2.2.1 (page 14) sont appliquées sur chaque élément et résolues par différentes méthodes numériques : la méthode des résidus pondérés de Galerkin, la méthode de Newton-Raphson pour résoudre les non-linéarités, le schéma d'Euler pour résoudre l'aspect non-stationnaire et la méthode d'élimination de Gauss pour résoudre le système algébrique. Le programme de calcul utilisé pour résoudre ces équations d'écoulement est développé par l'INRS-Eau depuis les années 85-86. Quoique mathématiquement beaucoup plus complexes, les programmes de calcul utilisés aujourd'hui sont offerts sous la forme de logiciels facilement utilisables par l'hydraulicien, ou le biologiste possédant les notions de base des écoulements en rivière.





#### 2.2.2.3 Les conditions aux limites

Pour réaliser une simulation hydrodynamique, l'imposition de conditions aux limites est nécessaire pour garantir l'unicité de la solution. Deux types de scénarios de conditions aux limites peuvent être utilisés : un schéma niveau-niveau ou un schéma niveau-débit. Dans le premier cas, un niveau d'eau est imposé à la section amont et un autre à la section aval. Par ailleurs, dans un schéma niveau-débit, une valeur de débit est imposée à l'amont alors qu'à l'aval, l'imposition d'un niveau d'eau est toujours nécessaire.

#### 2.2.2.4 Les conditions initiales

Quoique les études d'habitats en rivière considèrent le régime d'écoulement comme quasipermanent, l'obtention d'une solution stationnaire demande l'initialisation du programme sur un état de départ. Dans MEFLU, les autres états sont obtenus directement et par étape successives à partir d'un état convergé antécédent. Pour assurer la stationnarité, le pas de temps de la simulation est supposé très long.

### 2.2.3 Synthèse sur les modèles hydrodynamiques

Le tableau 1 présente en résumé les principales caractéristiques des modèles hydrodynamiques utilisés dans PHABSIM et HABIOSIM et présentés aux sections 2.2.1 et 2.2.2.

	PHABSIM		HABIOSIM
•	cellules longitudinales avec un noeud au milieu	•	méthode des éléments finis dont l'élément de base est un triangle à six noeuds
•	IFG-4 : relation empirique niveau-débit à chaque section transversale MANSQ : utilisation de l'équation de Manning à cha- que section transversale	•	<ul> <li>les équations de Saint-Venant respectant les principes suivants :</li> <li>Conservation de la masse</li> <li>Conservation de la quan- tité de mouvement</li> </ul>
•	WSP : méthode des courbes de remous		<ul> <li>Mobilité de la frontière</li> </ul>
•	les valeurs de vitesse, profon- deur et substrat sont attri- buées à la totalité de la sur- face d'une cellule	•	la vitesse est interpolée quadrati- quement sur l'élément le niveau d'eau et la profondeur sont interpolés linéairement sur l'élément le substrat est uniforme sur cha-
	•	<ul> <li>PHABSIM</li> <li>cellules longitudinales avec un noeud au milieu</li> <li>IFG-4 : relation empirique niveau-débit à chaque section transversale</li> <li>MANSQ : utilisation de l'équation de Manning à cha- que section transversale</li> <li>WSP : méthode des courbes de remous</li> <li>les valeurs de vitesse, profon- deur et substrat sont attri- buées à la totalité de la sur- face d'une cellule</li> </ul>	<ul> <li>PHABSIM</li> <li>cellules longitudinales avec un noeud au milieu</li> <li>IFG-4 : relation empirique niveau-débit à chaque section transversale</li> <li>MANSQ : utilisation de l'équation de Manning à cha- que section transversale</li> <li>WSP : méthode des courbes de remous</li> <li>les valeurs de vitesse, profon- deur et substrat sont attri- buées à la totalité de la sur- face d'une cellule</li> </ul>

Tableau 1 : Présentation d'un tableau résuma	nt les principales caractéristiques des
modèles hydrodynamiques utilisé	s dans PHABSIM et HABIOSIM.

### 2.2.4 Modèle biologique

### 2.2.4.1 Indices de préférence de base

Le modèle biologique a pour but de traduire quantitativement la préférence du poisson pour certaines valeurs de vitesses, profondeurs et substrat. Cette préférence est le plus souvent présentée sous la forme de courbes univariées (voir figure 15 à la page 60). On y retrouve

en abscisse les valeurs des variables abiotiques (vitesse, profondeur ou substrat) et en ordonnée, l'indice de base de ces variables variant entre 0 pour une valeur nulle d'habitat et 1 pour un habitat où la variable satisfait aux exigences de l'espèce à la phase de vie considérée.

Il existe deux catégories de courbes : les courbes d'utilisation et les courbes de préférence. Les courbes d'utilisation sont construites à partir d'observations sur le terrain et ne sont pas pondérées par la disponibilité en habitat. Elles traduisent l'utilisation actuelle du milieu par la population. Ces courbes ne sont donc pas transférables d'un site à l'autre. Les courbes de préférences sont issues des courbes d'utilisation actuelle du milieu pondérées par la disponibilité totale de ce milieu en habitat ou alors, dérivées de la littérature. Elles sont considérées comme transférables d'un site à l'autre quoique cette hypothèse soit très controversée (Bozek and Rahel 1992; Orth 1987; Shirvell 1989; Thomas and Bovee 1993). On retrouve dans Bovee (1986) des explications détaillées sur l'établissement des courbes de préférence d'habitat.

#### 2.2.4.2 Indice global d'habitat

Afin d'obtenir un indice global multivarié pour chaque point de calcul, les indices de base sont combinés à l'aide d'une moyenne géométrique pondérée. Ces pondérations peuvent être obtenues en affectant à chacun des indices de base un exposant estimé par une analyse en composantes principales qui permet d'évaluer la contribution relative de chaque variable physique à la variabilité des sites d'échantillonnage (Leclerc *et al.* 1994). Souvent le poids alloué aux variables sera constant.

(11) 
$$I_G = \alpha * I_P^{a_P} * I_V^{a_V} * I_S^{a_S} \text{ avec, } a_P + a_V + a_S = 1$$

où,

 $I_G$  = indice global

 $I_P, I_V, I_S$  = indices de base (profondeur, vitesse, substrat)

$a_P.a_V,a_S$	= pondération des indices de base
α	= facteur inhibiteur ou atténuateur où, $\alpha = \alpha(T^{\circ}, C_i,)$
	avec $T^{\circ}$ = température et $C_i$ = concentration en contaminan

Cette approche algébrique est celle utilisée pour cette étude, mais il existe d'autres modèles pour calculer l'indice global (Milhous *et al.* 1989) qui peuvent conduire à des résultats différents (Gan and McMahon 1990).

#### 2.2.4.3 Calcul de l'aire pondérée utile (APU)

L'APU est une mesure synthétique de la valeur de l'habitat pour un débit donné et résulte de l'intégration de la surface du site par rapport à sa valeur locale d'habitat (indice global). Le résultat est une superficie ( $m^2$ ). En normalisant par la superficie du site A, on obtient la valeur globale d'habitat du tronçon (en relatif) qui peut s'exprimer en pourcentage.

(12) 
$$APU\% = \frac{APU*100}{A}$$

ou en valeur unitaire, ce qui revient à calculer l'indice global moyen sur le site.

(13) 
$$\overline{IG} = \frac{APU}{A}$$

Ainsi, si l'indice global moyen était de 1, l'ensemble du site serait considéré partout comme un habitat préférentiel.

Pour calculer l'APU<sup>C</sup> sur une cellule de PHABSIM, il s'agit de multiplier la valeur de l'indice global ( $I_G^c$ ) au point de mesure de cette cellule par la surface de cette cellule ( $A^c$ ).

$$APU^{C} = I_{G}^{C} * A^{C}$$

En modélisation hydrodynamique bidimensionnelle par éléments finis, le T-6 (figure 2) est divisé en quatre éléments à trois noeuds (figure 3).



Figure 3 :Illustration de l'élément T-3 utilisé dans le calcul des aires pondérées utiles

L'APU est d'abord calculée sur chaque élément e (APU<sup>e</sup>), et les APU<sup>e</sup> du domaine sont ensuite sommées pour donner une valeur cumulée d'APU totale au site. Les équations suivantes sont utilisées :

(15) 
$$APU^{e} = \left(\frac{I_{G1} + I_{G2} + I_{G3}}{3}\right) * A^{e}$$

(16) 
$$A^{e} = \frac{1}{2} \left[ (x_{2} - x_{1})(y_{3} - y_{1}) - (x_{3} - x_{1})(y_{2} - y_{1}) \right]$$

(17) 
$$APU = \sum_{e=1}^{NE} APU^{e}$$

où,

 $I_{G1}$ ,  $I_{G2}$ ,  $I_{G3}$  = indice global de chaque noeud du T-3

 $A^e$  = aire de l'élément e

x, y =coordonnées

*NE* = nombre d'éléments du domaine d'écoulement

# 2.3 Objectifs spécifiques de la recherche

Dans le contexte des différences méthodologiques importantes entre les approches bidimensionnelles et unidimensionnelles de la modélisation des microhabitats, nous avons choisi de poursuivre les objectifs spécifiques suivants :

- Objectif 1 : comparer les résultats de disponibilité d'habitats obtenus avec une discrétisation des données semblable à PHABSIM à ceux obtenus avec une démarche bidimensionnelle précise (HABIOSIM), cette approche servant de valeur de référence ;
- Objectif 2 : analyser l'influence sur la disponibilité d'habitat d'une incertitude systématique et aléatoire représentative de données abiotiques de type PHABSIM ;

Objectif 3 : comparer les implications méthodologiques et logistiques des deux méthodes.

## 3.1 Démarche

Les étapes à suivre pour la modélisation des microhabitats dans PHABSIM sont bien documentées dans le rapport de Bovee (1982) et elles ont été décrites brièvement au chapitre précédent. Pour le modèle d'habitat, ces étapes sont sensiblement les mêmes pour une application HABIOSIM (Leclerc *et al.* 1995). La méthodologie développée pour cette étude a été inspirée de cette littérature.

Le schéma de la figure 4 présente sous forme d'organigramme la démarche utilisée pour comparer l'approches PHABSIM à HABIOSIM dans le cadre des objectifs de cette recherche. Nous allons décrire ci-après chacune des principales étapes comprises dans cette illustration.

## 3.2 Description du site d'étude

### **3.2.1** La rivière Sainte-Marguerite (Saguenay)

Ce projet de recherche a été réalisé dans le cadre de la programmation de recherche multidisciplinaire sur le saumon atlantique du Centre Inter-universitaire de Recherche sur le Saumon Atlantique (CIRSA). Le CIRSA a été créé suite à une initiative de la compagnie Alcan pour soutenir les efforts de conservation de la ressource saumon de la rivière Sainte-Marguerite située dans la région du Saguenay.



# Figure 4 :Schéma des principales étapes de la méthodologie utilisée pour comparer les approches PHABSIM et HABIOSIM

24

La rivière Sainte-Marguerite est le principal affluent de la rivière Saguenay en aval du lac Saint-Jean. La branche principale de la rivière Sainte-Marguerite prend sa source à quelques 40 km de Chicoutimi et se joint au bras nord-est de la rivière Sainte-Marguerite juste avant de se jeter en rive gauche dans le Saguenay à 25 km de Tadoussac (figures 5 et 6). La longueur totale de la branche principale de la rivière Sainte-Marguerite est de 92 km et *s*, la pente moyenne, est de 0,0077. La route 172 longe et entrecoupe la rivière sur plus de 30 km. Le secteur présentant un intérêt particulier, à cause de la détérioration de ses habitats, se situe dans les 57 derniers kilomètres de la branche principale, là où plus de 5,7 km de méandres ont été coupés pour faire passer la route 172, causant ainsi l'ensablement de nombreuses fosses et le colmatage de plusieurs frayères. Depuis ces travaux, la rivière cherche à retrouver son équilibre en érodant les berges de sable (Beaulieu et Dion 1991). Plusieurs travaux de protection des berges ont déjà été effectués dans ce secteur, mais la morphologie du cours d'eau continue de changer après chaque crue. La région du Saguenay est un secteur boisé et possède un relief très accidenté.

#### 3.2.2 Choix d'un tronçon

La première étape dans la démarche de modélisation des microhabitats est le choix d'un tronçon d'étude. Le tronçon est soit représentatif d'un secteur de la rivière ou soit critique pour la survie d'une espèce de poisson dans la rivière. Les critères de base pour la sélection d'un tronçon critique sont sa sensibilité à une variation du débit et sa pertinence pour le stade ciblé de l'espèce, de sorte qu'il soit possible de conclure que si le choix d'un débit réservé est satisfaisant pour ce tronçon, il le sera sur la plupart des secteurs de la rivière.

Dans le cadre de cette étude, l'habitat d'un stade spécifique du saumon n'était pas un paramètre de sélection déterminant du tronçon. Le caractère hétérogène et complexe de l'hydrodynamique du cours d'eau était un critère beaucoup plus important pour tester la fiabilité de deux modèles hydrodynamiques différents. Pour cette raison, le tronçon recherché devait comporter des faciès hydrodynamiques diversifiés, soit une suite de seuils, de rapides et de fosses dans un secteur méandré.

La longueur de tronçon raisonnable pour une analyse du type PHABSIM est de 10 à 14 fois sa largeur (Bovee 1982), ce qui correspond en moyenne à une longueur d'onde de méandre. La largeur moyenne de la rivière Sainte-Marguerite étant typiquement de 50 mètres, une longueur de 500 mètres aurait été jugée suffisante. Toutefois, pour obtenir une plus grande diversité morphologique, et afin de minimiser les imprécisions aux frontières du modèle hydrodynamique bidimensionnel causées par l'imposition des conditions aux limites, nous avons doublé cette exigence. Le tronçon choisi s'allonge sur 1100 mètres.

Le tronçon retenu est délimité à l'amont par la jonction de la rivière Sainte-Marguerite et du Bras Nord-ouest à environ 41 km en amont de la baie Sainte-Marguerite, et se termine à l'aval à quelques mètres en amont de la fosse appelée Glass Pool



### Figure 5 : Plan de localisation du tronçon à l'étude sur la branche principale de la rivière Sainte-Marguerite (d'après un plan de Solivar, 1991)

Chapitre 3, Méthodologie





### 3.2.3 Hydrologie

Le bassin hydrographique de la rivière Sainte-Marguerite draine un territoire de 2115 km<sup>2</sup>. Ce bassin se divise en deux sous-bassins approximativement d'égale importance, soit celui de la branche principale qui couvre une superficie de 980 km<sup>2</sup>, et celui de la branche nordest qui couvre une superficie de 1135 km<sup>2</sup>. Comme il n'existe qu'une station de jaugeage sur le bras nord-est de la rivière Sainte-Marguerite, une méthode d'estimation des débits a été calibrée (MENVIQ, publication n° HP40) par rapport aux données statistiques disponibles sur la branche nord-est.

Les tableaux 2 et 3 présentent les débits d'étiage et de crue pour le tronçon à l'étude. Les données de ces tableaux, qui proviennent du rapport de Beaulieu et Dion (1991), ont été calculées à l'aide de la méthode régionale (MENVIQ, publication n° HP37).

Période de récurrence (années)	Valeur moyenne pour « X » jours consécutifs (m³/s)					
	1 jour	7 jours	<b>30</b> jours			
2	2,20	2,71	3,69			
5	1,45	1,94	2,63			
10	1,10	1,57	2,22			
20	0,87	1,29	1,83			
50	0,66	1,01	1,48			
100	0,52	0,78	1,27			

Tableau 2 : Statistiques des débits d'étiage sur le tronçon à l'étude
Période de récurrence (années)	Valeur moyenne pour « X » jours consécutifs (m <sup>3</sup> /s)						
	1 jour	7 jours	<b>30 jours</b>				
2	152	106	67				
5	191	131	82				
10	214	147	89				
20	237	163	97				
50	265	163	108				
100	287	210	114				

# 3.3 Relevés de terrain

Les relevés de terrain comprennent la topographie du site (lit mineur), la composition du substrat du lit, des conditions d'hydraulicité pour l'établissement d'une relation niveau-débit ainsi que des données de validation de niveau d'eau et de vitesse pour le modèle 2D.

# 3.3.1 Relevés topographiques

#### **3.3.1.1** Positionnement des points de mesure

Plusieurs points géoréférencés sont mesurés sur le site afin de cartographier la topographie du tronçon à modéliser. Le nombre de mesures nécessaire est fonction de la complexité de la morphologie du cours d'eau. Par exemple, peu de points de mesures sont nécessaires pour bien caractériser un canal relativement uniforme de pente régulière ; par contre, un bief très accidenté requiert des mesures plus rapprochées, c'est à dire une densité appropriée à la variabilité. Concernant le positionnement des points de mesure (organisation spatiale), l'approche PHABSIM requiert des transects de mesure positionnés très rigoureusement entre deux berges. L'approche bidimensionnelle d'HABIOSIM s'appuie plutôt sur une stratégie de caractérisation de type « semis de points », laquelle permet de mieux répartir l'effort de mesure de la topographie et d'obtenir une carte plus représentative (Ghanem 1994). C'est cette deuxième stratégie qui a été adoptée et les données de transects nécessaires à PHAB-SIM ont été extraites du modèle d'élévation 2D.

# 3.3.1.2 Méthode de positionnement pour la cueillette de données topographiques

Pour caractériser le tronçon à l'étude, la technologie de positionnement par satellite GPS (Global Positionning System) en mode différentiel a été retenue dans un premier temps afin d'en tester le potentiel. Les instruments et logiciels nécessaires ont été loués à la compagnie VIASAT à Montréal. Cet outil de travail permet de déterminer avec une bonne précision les coordonnées d'une position en quelques secondes d'observation. La précision verticale et horizontale obtenue est de l'ordre de quelques centimètres. La saisie de données en mode différentiel est possible lorsque deux antennes enregistrent en même temps des observations GPS. Il s'agit d'installer une antenne fixe à une coordonnée connue et de se positionner ailleurs sur le terrain avec une antenne mobile. Deux ordinateurs, un à la station fixe et un portable pour le terrain, enregistrent en même temps les observations de satellites captées par les antennes. Un minimum de quatre satellites (constellation) doit être visible en tout temps pour que l'horloge interne soit bien ajustée et que la position de l'antenne mobile soit bien géoréférencée.

Dans un premier temps, le GPS a été très utile pour installer de nombreux repères géodésiques (11) sans qu'il soit nécessaire de transférer l'information par voie terrestre (ex: réseau de nivellement par station totale). Cette procédure a permis de localiser le tronçon dans un système cartographique global (UTM ou MTM) même si la borne géodésique la plus proche se situait à une trentaine de kilomètres du site. Malgré le potentiel du GPS, il a été jugé plus efficace finalement de travailler principalement avec une station totale puisque le relief accidenté du Saguenay et de la rivière Sainte-Marguerite nuit à la visibilité des satellites (constellation). La station totale utilisée était de marque Sokkia. C'est un outil couramment utilisé pour la cueillette de données topographiques. La station totale consiste en un théodolite doté d'un émetteur laser infrarouge lui permettant de mesurer la distance le séparant d'un miroir au point mesuré. La précision offerte par ce type d'appareil est de l'ordre du millimètre. L'efficacité de l'appareil n'est limitée que par la distance maximale d'observation et la visibilité du point mesuré.

## 3.3.1.3 Résultat de la cueillette de données topographiques

Au total, 3300 points topographiques ont été récoltés sur le tronçon étudié, ce qui correspond à environ un point/8 m<sup>2</sup>. Afin d'obtenir une bonne interpolation des données recueillies, il est important d'avoir une bonne densité de points cotés aux endroits où la variation du relief est prononcée. Par ailleurs, lorsque la pente du sol est faible et régulière, une moins grande densité de points est nécessaire. La figure 7 présente la disposition des données topographiques recueillies. Sur cette figure, les repères géodésiques sont identifiés de 2 à 10 et précédés d'un astérisque. La carte des isosurfaces de la topographie obtenue d'après les données recueillies sera présentée plus loin à la figure 13, page 54. Sur cette carte, les isosurfaces sont tracées aux 25 cm.





## 3.3.2 Substrat - méthode de caractérisation

La composition du substrat qui constitue le lit de la rivière est une donnée essentielle pour la modélisation des microhabitats. Son importance intervient particulièrement dans l'étude des points suivants :

- Écoulement : le coefficient de rugosité du modèle hydrodynamique étant une fonction de la distribution granulométrique du substrat, les vitesses d'écoulement vont être grandement influencées par le substrat, en particulier pour de faibles profondeurs d'eau;
- 2. *Habitats piscicoles* : le substrat permet au saumon de s'abriter contre les forts courants en plus d'offrir une position stratégique pour capturer la dérive;
- 3. *Frai* : le degré d'ensablement et la distribution granulométrique du substrat sont des facteurs influençant la qualité des frayères.

Conséquemment, la description physique du substrat a été principalement axée sur des paramètres représentatifs de la variabilité spatiale, faciles à estimer par observation directe, et correspondant aux besoins de la modélisation. Le  $d_{85}$ , le  $d_{50}$ , le degré d'ensablement et la distribution granulométrique du substrat (sable, gravier, cailloux, galets et blocs) sont les variables retenues pour la caractérisation. La définition de ces classes est présentée au tableau 4. Pour cette étude, le  $d_{85}$  représente le diamètre pour lequel 85 % de la superficie est occupée par un granulat de taille inférieure. Le  $d_{50}$  est le diamètre médian du granulat de la surface observée et le degré d'ensablement consiste en une évaluation sur une échelle de 0 à 3 du degré de colmatage des matériaux en surface du lit par le sable. Ainsi, une cote de zéro serait donnée à un secteur où les interstices laissent facilement circuler l'eau (aucun colmatage). Le degré 3 au contraire laisse voir seulement les sommets des gros matériaux et les interstices sont bouchés par le sable. Cette variable a été estimée visuellement. Comme il a été mentionné déjà, le choix des paramètres utilisés est essentiellement fondé sur leur utilisation dans les différentes étapes de la modélisation des microhabitats comme le montre le tableau 5.

Classe de substrat	Diamètre caractéristique (mm)
Sable	de 0,0625 à 4
Gravier	de 4 à 32
Caillou	de 32 à 64
Galets	de 64 à 256
Blocs	256 et plus

Tableau 4 :Classes de substrat utilisées pour définir les assemblages granulométriques (C.K. Wentworth)

Tableau 5 :Utilisation	des différents	paramètres du	u substrat selon	le contexte
------------------------	----------------	---------------	------------------	-------------

PARAMÈTRES	BUT
Distribution granulométrique	<ul><li>Indice de qualité de l'habitat</li><li>Interprétation géomorphologique</li></ul>
<i>d</i> <sub>50</sub>	<ul><li>Facteur de rugosité</li><li>Indice de qualité de l'habitat</li></ul>
d <sub>85</sub>	<ul><li>Interprétation géomorphologique</li><li>Facteur de rugosité</li></ul>
Ensablement	<ul><li>Indice de qualité de l'habitat</li><li>Qualité de la frayère</li></ul>

Pour la caractérisation du substrat sur le tronçon à l'étude, 77 sous-domaines ont été délimités représentant des zones homogènes. La délimitation de ces zones est montrée à la figure 8 et la description du substrat pour chaque zone est présentée au tableau 6. Les valeurs du coefficient de Manning présentées dans ce tableau proviennent d'une loi de comportement empirique citée dans Leclerc *et al.* (1991). Cette relation (équation 18) est celle qui a été utilisée dans les simulations hydrodynamiques 2-D.

(18) 
$$\frac{1}{n} = 14,54 \log \left[\frac{22,8}{\overline{d'}}\right]$$

où,

n =coefficient de Manning

 $\overline{d}'$  = diamètre moyen des aspérités ou des matériaux du lit.

Le diamètre moyen est calculé à partir de l'assemblage granulométrique présent sur le site.

(19) 
$$\overline{d'} = \sum_{i=1}^{P} w_i d_i$$

où,

- $d_i$  = diamètre moyen, sur une échelle logarithmique, de la classe de substrat *i*
- $w_i$  = pondération utilisée selon le nombre de classes de substrat présentes à un endroit et selon leur importance relative
- *p* = nombre de classes de substrat identifiées en un lieu particulier

	Groupe No.	d <sub>50</sub> [mm]	d <sub>85</sub> [mm]	Ensable- ment	Sable	Gravier	Caillou	Galet	Bloc	<i>n</i> de Manning
-	1	81	140	1	0	0,1	0,3	0,6	0	0,0286
	2	5	20	0	0,5	0,4	0,1	0	0	0,0197
	3	40	100	1	0	0,2	0,4	0,4	0	0,0273
	4	40	140	2	0,1	0,1	0,3	0,5	0	0,0278
	5	10	35	3	0,4	0,5	0,1	0	0	0,0199
	6	40	100	2	0,1	0,2	0,1	0,6	0	0,0281
	7	5	25	0	0,4	0,6	0	0	0	0,0186
	8	12	25	3	0,3	0,7	0	0	0	0,0189
	9	39	70	2	0,1	0,3	0,4	0,2	0	0,0253
	10	2	10	0	0,6	0,3	0,1	0	0	0,0195
	11	45	100	0	0	0,1	0,3	0,6	0	0,0286
	12	28	60	1	0,1	0,5	0,3	0,1	0	0,0237
	13	2	40	3	0,7	0,1	0,1	0,1	0	0,0222
	14	10	25	0	0	0,8	0,2	0	0	0,0214
	15	29	52	0	0	0,5	0,4	0,1	0	0,0242
	16	40	85	1	0,1	0,3	0,4	0,2	0	0,0253
	17	5	110	0	0,5	0,2	0,1	0,2	0	0,0240
	18	2	2	3	0,9	0	0,1	0	0	0,0188
	19	45	70	2	0,4	0,1	0,3	0,2	0	0,0248
	20	35	65	2	0,2	0,4	0,3	0,1	0	0,0236
	21	70	110	1	0,1	0,2	0,3	0,4	0	0,0270
	22	80	140	1	0,1	0,1	0,3	0,5	0	0,0278
	23	50	80	1	0,1	0,1	0,4	0,4	0	0,0272
	24	40	85	1	0,1	0,3	0,4	0,2	0	0,0253
	25	25	55	2	0,2	0,3	0,3	0,2	0	0,0249
	26	60	110	1	0,1	0,1	0,2	0,6	0	0,0283
	27	60	100	1	0,1	0,2	0,3	0,4	0	0,0270
	28	55	100	1	0	0,2	0,2	0,6	0	0,0284
	29	50	95	1	0,1	0,1	0,3	0,5	0	0,0286
	30	50	95	1	0	0,1	0,3	0,6	0	0,0286
	31	35	65	2	0,2	0,4	0,3	0,1	0	0,0236
	32	55	100	1	0	0,2	0,2	0,6	0	0,0284
	33	55	100	1	0	0,2	0,2	0,6	0	0,0284
	34	50	95	1	0,1	0,1	0,3	0,5	0	0,0278
	35	40	85	1	0,1	0,3	0,4	0,2	0	0,0253
	36	20	50	2	0,2	0,3	0,3	0,2	0	0,0249
	37	20	50	2	0,2	0,3	0,3	0,2	0	0,0249
	38	25	55	2	0,2	0,3	0,3	0,2	0	0,0249
	39	50	95	1	0	0,1	0,3	0,6	0	0,0286

Tableau 6 : Caractéristiques des différents groupes de substrats

Groupe No.	d <sub>50</sub> [mm]	d <sub>85</sub> [mm]	Ensable- ment	Sable	Gravier	Caillou	Galet	Bloc	<i>n</i> de Manning
40	30	70	2	0,1	0,4	0,3	0,2	0	0,0250
41	50	95	1	0	0,1	0,3	0,6	0	0,0286
42	55	120	2	0	0,1	0,4	0,5	0	0,0281
43	40	95	1	0,1	0,1	0,4	0,4	0	0,0272
44	35	80	1	0,1	0,2	0,4	0,3	0	0,0263
45	45	110	2	0	0,1	0,5	0,4	0	0,0275
46	35	80	1	0,1	0,2	0,4	0,3	0	0,0263
47	2	65	3	0,7	0,1	0,1	0,1	0	0,0222
48	30	75	3	0,4	0,2	0,3	0,1	0	0,0235
49	2	50	3	0,5	0,3	0,1	0,1	0	0,0224
50	2	2	0	1	0	0	0	0	0,0158
51	2	15	1	0,4	0,6	0	0	0	0,0186
52	5	50	1	0,5	0,3	0,1	0,1	0	0,0224
53	5	30	2	0,5	0,5	0	0	0	0,0183
54	2	2	0	1	0	0	0	0	0,0158
55	2	10	2	0,6	0,3	0,1	0	0	0,0195
56	2	10	1	0,7	0,2	0,1	0	0	0,0193
57	25	100	3	0,4	0,3	0,2	0,1	0	0,0230
58	55	110	2	0	0,2	0,3	0,5	0	0,0278
59	2	50	0	0,9	0	0,1	0	0	0,0188
60	1 000	1 000	0	0	0	0	0	1	0,0415
61	2	2	0	1	0	0	0	0	0,0158
62	170	260	2	0,1	0	0	0,4	0,5	n/d
63	230	350	1	0,1	0	0	0,1	0,8	0,0395
64	2	2	0	1	0	0	0	0	0,0158
65	130	450	0	0,1	0	0	0,3	0,6	0,0376
66	10	70	3	0,2	0,3	0,3	0,2	0	0,0249
67	25	80	2	0,1	0,4	0,4	0,1	0	0,0241
68	55	80	2	0,1	0,2	0,4	0,3	0	0,0263
69	80	120	1	0	0,1	0,4	0,5	0	0,0281
70	2	12	0	0,8	0,2	0	0	0	0,0171
71	15	63	3	0,1	0,4	0,4	0,1	0	0,0241
72	2	40	3	0,8	0,1	0,1	0	0	0,0190
73	6	15	0	0,4	0,6	0	0	0	0,0186
74	35	85	2	0,2	0,1	0,3	0,4	0	0,0270
75	200	500	1	0,2	0	0	0,2	0,6	0,0373
76	85	400	0	0,3	0	0	0,3	0,4	0,0347
77	2	45	3	0,5	0,3	0,1	0,1	0	0,0224

Tableau 6 : Caractéristiques des différents groupes de substrats





# 3.3.3 Station de jaugeage

Une station limnimétrique a été installée par l'équipe de Michel Lapointe, professeur à l'université McGill, afin de connaître le débit journalier durant la période estivale de 1995. Au total, quatre jaugeages ont été effectués dans le but d'établir une relation entre le débit du tronçon à l'étude et le niveau enregistré à la station limnimétrique. Le tableau 7 présente les résultats de ces jaugeages. Un retour sur le terrain au mois de novembre de cette même année nous a permis d'obtenir des données pour un débit plus élevé (19,2 m<sup>3</sup>/s). La position de la section de jaugeage est indiquée sur la figure 10.

Date	Niveau relatif mesuré à la station de jaugeage	Débit mesuré (m <sup>3</sup> /s)	
	( <b>m</b> )	n	
6 juillet 1995	1,02	7,0	
20 juillet 1995	1,03	7,4	
20 août 1995	0,84	2,4	
24 août 1995	0,90	3,6	
8 novembre 1995	1,25	19,2	

Tableau 7 : Résultats des jaugeages sur le tronçon à l'étude

## 3.3.4 Relation niveau-débit

L'établissement d'un modèle hydrodynamique requiert l'imposition de conditions aux limites représentatives de l'hydraulicité du tronçon étudié. Pour ce faire, il est nécessaire de connaître la variation du niveau d'eau à l'aval du tronçon choisi en fonction du débit. L'équation 20 a été utilisée pour décrire la relation niveau-débit à l'aval du tronçon à l'étude.

(20) 
$$Q = a(WSL - SZF)^{b}$$

où,

 $Q = debit (m^3/s)$ 

*WSL* = élévation de la surface d'eau (m), (Water Surface Level)

SZF =élévation de la surface à un débit nul (m), (Surface at Zero Flow)

a, b =coefficients empiriques

Les coefficients *a* et *b* sont déterminés empiriquement à partir des valeurs disponibles (niveau, débit). Le niveau d'eau doit donc être mesuré à l'aval du tronçon pour un minimum de trois débits idéalement, couvrant le mieux possible l'ensemble du registre hydrologique, des étiages aux crues. Dans ce cas-ci, le débit maximum qui avait été mesuré (19,2 m<sup>3</sup>/s) était relativement faible par rapport au débit maximum simulé (100 m<sup>3</sup>/s). Par conséquent, la relation développé ne correspond peut-être pas au comportement hydraulique à cet endroit. Toutefois, c'est une relation très plausible et l'inexactitude du résultat n'affecte en rien l'objectif visé dans cette recherche.

La relation a donc été développée à partir des niveaux mesurés à l'aval pour les débits de 7,4 m<sup>3</sup>/s et 19,2 m<sup>3</sup>/s et de l'élévation de la surface pour un débit nul. Ces niveaux sont respectivement de 111,10 mètres et de 111,43 mètres. L'élévation de la surface pour un débit nul est de 109,41 mètres. Cette valeur correspond à l'élévation de la section de contrôle hydraulique située à l'aval de notre section de jaugeage. L'équation 21 décrit la relation niveau-débit à l'aval du tronçon et le graphique de la figure 9 représente cette relation.

(21) 
$$Q = 0.39(WSL - 109.41)^{5.508}$$



Figure 9 :Relation niveau-débit à l'aval du tronçon à l'étude

## 3.3.5 Relevés de validation

Pour la validation du modèle hydrodynamique, des mesures de vitesse ponctuelles ont été prises à différents endroits pour chaque période de jaugeage. Des niveaux d'eau pour différentes sections ont également été mesurés pour ces mêmes débits. L'instrument de mesure utilisé pour les vitesses est un moulinet Global Flow Probe et sa précision est de 0,03 m/s. Ce courantomètre ne permet pas de déterminer la direction du courant. Des vitesses et des niveaux ont donc été mesurés pour les débits du 20 juillet (débit de 7,4 m<sup>3</sup>/s : n = 24 ou 51 si l'on inclut les mesures de la section de jaugeage) et du 8 novembre (débit de 19,2 m<sup>3</sup>/s : n = 8 ou 24 si l'on inclut les mesures de la section de jaugeage). L'emplacement des points de mesure des vitesses est montré sur les figures 10 et 11.



Figure 10 :Rivière Sainte-Marguerite : localisation des points de mesure des vitesses et de la section de jaugeage au débit de 7,4 m<sup>3</sup>/s le 20 juillet 1995





# 3.4 Simulation hydrodynamique bidimensionnelle (2-D)

# 3.4.1 Modèle numérique de terrain

La première étape cléricale d'un projet de modélisation hydrodynamique bidimensionnelle est la construction d'un modèle numérique de terrain (MNT) lequel portera notamment la topographie mesurée ainsi que la composition du substrat. Le modèle numérique de terrain est porté par un maillage d'éléments finis triangulaires, dont le raffinement dépend des besoins locaux de précision. Le maillage du modèle numérique de terrain qui sert également de maillage hydrodynamique pour la présente recherche (figure 12) comporte 8276 noeuds et 3885 éléments dont la taille maximum atteint 7 m. Le maillage est construit avec le logiciel MODELEUR (Secretan *et al.* 1996)

Avec un tel maillage, le nombre d'inconnues hydrodynamiques du problème (u,v,h) est de 24828. Chaque noeud sommet des éléments de ce maillage portera l'information concernant la topographie et le substrat. Une triangulation de Delaunay entre les points de mesures récoltés est produite à l'aide du logiciel MODELEUR (Secretan *et al.* 1996). Elle permet d'interpoler les valeurs de la topographie aux noeuds du MNT.

# 3.4.2 Calibration du modèle hydrodynamique 2-D

Puisque la rivière Sainte-Marguerite n'est pas soumise aux effets de la marée, on peut considérer son écoulement comme étant quasi-stationnaire et effectuer une simulation hydrodynamique en régime permanent. Dans ce genre de simulation, la solution ne dépend pas des conditions initiales. Il est cependant nécessaire d'initialiser le modèle en vue de faciliter la résolution de problèmes stationnaires. Cette initialisation est obtenue par une procédure de linéarisation des termes de frottement du modèle Saint-Venant





Les conditions aux limites imposées pour les simulations hydrodynamiques sont du type débit amont-niveau aval. Un débit est ainsi imposé à l'amont du tronçon, tandis qu'un niveau est spécifié à l'aval. Les premières simulations servent à l'ajustement des coefficients de rugosité (« n » de Manning) et du paramètre de viscosité turbulente; ce sont les simulations de calibration. Les simulations sont calibrées sur des événements pour lesquels on possède des mesures de vitesses et de niveau à différents endroits sur le tronçon. Habituellement, peu d'ajustements doivent être apportés aux coefficients de rugosité puisque ceux-ci sont déjà calculés à partir des données d'assemblage granulométriques présents sur le site (équation 18), ce qui fut le cas ici. Le tableau 6 (voir à la page 37) donne la valeur des coefficients appliqués en fonction des zones granulométriques identifiées sur le site.

Pour ce qui est de la viscosité turbulente, elle influence la convergence et elle est directement liée à la taille des éléments. Elle est décrite à l'aide d'une loi dite de « longueur de mélange » qui tient compte de la profondeur et des gradients de vitesse. (Boudreau *et al.* 1994). Elle est paramétrisée par une constante dont on recherche la valeur minimale qui assure encore la convergence du modèle. La valeur moyenne de la constante pour la viscosité turbulente qui a été utilisée pour les simulations hydrauliques du tronçon de la rivière Sainte-Marguerite est de  $0.8 \text{ m}^2/\text{s}$ .

## 3.4.3 Validation

Les événements utilisés pour la validation des simulations hydrodynamiques sont ceux correspondant aux campagnes de terrain du 20 juillet 1995 et du 8 novembre 1995. Les paramètres hydrologiques de ces journées sont présentés au tableau 8.

	20 juillet 1995	8 novembre 1995
Débit à l'amont du tronçon (m <sup>3</sup> /s)	7,4	19,2
Niveau à l'amont du tronçon (m)	112,03	112,23
Niveau à l'aval du tronçon (m)	111,10	111,43

Tableau 8 :Conditions aux limites ayant servi à la validation du modèle hydrodynamique

Les résultats de la comparaison des vitesses et des niveaux calculés et mesurés sur le tronçon se retrouvent aux tableaux 9 et 10. Les coordonnées sont spécifiées en mètres dans un repère local. Les astérisques qui figurent sur les tableaux indiquent les points qui font partie de la section de jaugeage. Des écarts moyens de 3,7 cm et de 4,4 cm ont été obtenus sur les valeurs des niveaux d'eau calculées aux deux débits de validation, soit 7,4 m<sup>3</sup>/s et 19 m<sup>3</sup>/s. Les valeurs de vitesses moyennes calculées au débit de 7,4 m<sup>3</sup>/s ont un écart moyen de 0,1 m/s soit 5,6% en valeur relative par rapport aux valeurs mesurées sur le terrain. Cet écart est acceptable compte tenu que le modèle ne tient pas compte des phénomènes locaux parfois occasionnés par des blocs erratiques ou des débris forestiers. L'écart moyen pour les vitesses mesurées au débit de 19,2 m<sup>3</sup>/s est plus prononcé, soit de 0,19 m/s ou 16%. Il est important de mentionner que le 8 novembre, la température était sous le point de congélation, ce qui a pu nuire à la performance du courantomètre.

	Statio	on	Pr	ofondeu (m)		Niveau (m)		Vitesse (m/s)			
No	x	у	mesurée	calculée	écart	mesuré	calculé	écart	mesurée	calculée	écart
1	508,2	-152,4	0,78	0,79	0,01	112,03	112,10	0,07	0,80	0,61	-0,19
2	535,9	-153,5	0,50	0,59	0,09	112,02	112,05	0,03	0,51	0,79	0,28
3	573,8	-161,7	0,62	0,61	0,01	112,06	112,05	-0,01	0,49	0,51	0,02
4	669,7	-136,5	0,92	0,94	0,02	111,67	111,77	0,10	0,82	0,39	-0,43
5	667,2	-134,3	0,50	0,61	0,11	111,70	111,77	0,07	0,53	0,43	-0,1
6	645	-98,3	0,42	0,51	0,09	111,70	111,73	0,03	0,34	0,47	0,13
7	673,3	-74,9	0,49	0,39	-0,10	111,64	111,71	0,07	0,14	0,45	0,31
8	667,7	-70,9	0,34	0,38	0,04	111,65	111,71	0,06	0,18	0,50	0,32
9	695,7	75,7	0,60	0,66	0,06	111,61	111,69	0,08	0,56	0,34	-0,22
10	684,7	-23,5	0,26	0,27	0,01	111,66	111,66	0	0,38	0,47	0,09
11	686,7	-2,4	0,58	0,62	0,04	111,61	111,65	0,04	0,71	0,64	-0,07
12	667,9	41,1	0,58	0,56	-0,02	111,57	111,60	0,03	0,87	0,68	-0,19
13	647,7	50,5	0,30	0,37	0,07	111,47	111,58	0,11	0,65	0,43	-0,22
14	847,8	98,6	0,62	0,61	-0,01	111,34	111,35	0,01	0,44	0,44	0
15	868,5	84,3	0,67	0,71	0,04	111,34	111,35	0,01	0,35	0,29	-0,06
16	871	90,3	0,92	0,93	0,01	111,33	111,35	0,02	0,36	0,33	-0,03
17	879	75,1	0,92	0,91	-0,01	111,34	111,35	0,01	0,31	0,20	-0,11
18	879,5	88	1,02	0,94	-0,08	111,35	111,35	0	0,31	0,30	-0,01
19	1 096	-39	1,10	1,06	-0,04	111,37	111,33	-0,04	0,19	0,25	0,06
20	1 086	-32,6	0,50	0,65	0,15	111,31	111,33	0,02	0,15	0,23	0,08
21	1 104	-45,2	0,80	0,80	0	111,33	111,33	0	0,28	0,33	0,05
22	1 155	-95,2	1,10	1,09	-0,01	111,08	111,12	0,04	0,32	0,47	0,15
23	1 169	-135,3	1,10	1,12	0,02	111,11	111,10	-0,01	0,28	0,42	0,14
*24	793	122	0	0	0	n/d	-	-	0	0	0
*25	793,8	123,2	0,08	0,06	-0,02	n/d	-	-	0,27	0,24	-0,03
*26	794,3	124,1	0,16	0,12	0,04	n/d	-	-	0,4	0,33	-0,07
*27	794,8	124,9	0,25	0,18	-0,07	n/d	-	-	0,5	0,42	-0,08
*28	795,4	125,8	0,29	0,23	-0,06	n/d	-	-	0,48	0,47	-0,01
*29	795,9	126,6	0,32	0,28	-0,04	n/d	-	-	0,46	0,51	0,05
*30	796.4	127.4	0.36	0.33	-0.03	n/d	-	-	0,52	0,56	0,04

Tableau 9 : Présentation des résultats de la validation pour le débit de 7 m<sup>3</sup>/s

	Station		Profondeur (m)				Niveau (m)			Vitesse (m/s)		
No	x	у	mesurée	calculée	écart	mesuré	calculé	écart	mesurée	calculée	écart	
*31	796,9	128,3	0,38	0,38	0	n/d	-		0,58	0,61	0,03	
*32	797,5	129,1	0,34	0,43	0,09	n/d	2	2	0,58	0,63	0,05	
*33	798	130	0,39	0,48	0,09	n/d			0,59	0,65	0,06	
*34	798,5	130,8	0,43	0,53	0,10	n/d			0,61	0,67	0,06	
*35	799,1	131,6	0,48	0,57	0,09	n/d	35	-	0,68	0,69	0,01	
*36	799,6	132,5	0,53	0,6	0,07	n/d	12	-	0,66	0,70	0,04	
*37	800,1	133,3	0,60	0,63	0,03	n/d	1.00	-	0,76	0,70	-0,06	
*38	800,7	134,2	0,61	0,65	0,04	n/d	17		0,76	0,71	-0,05	
*39	801,2	135	0,64	0,68	0,04	n/d	620	-	0,74	0,71	-0,03	
*40	801,7	135,8	0,65	0,71	0,06	n/đ	-		0,71	0,7	-0,01	
*41	802,2	136,7	0,70	0,70	0	n/d		1	0,78	0,68	-0,10	
*42	802,8	137,5	0,77	0,69	-0,08	n/d			0,67	0,65	-0,02	
*43	803,3	138,4	0,77	0,67	-0,10	n/d	-	2	0,66	0,63	-0,03	
*44	803,8	139,2	0,68	0,63	-0,05	n/d		۲	0,71	0,6	-0,11	
*45	804,4	140	0,63	0,58	0,05	n/d	-	1	0,67	0,55	-0,12	
*46	804,9	140,9	0,56	0,52	-0,04	n/d		-	0,56	0,51	-0,05	
*47	805,4	141,7	0,48	0,46	-0,02	n/d	-	-	0,60	0,45	-0,15	
*48	806	142,6	0,36	0,37	0,01	n/d		-	0,49	0,39	-0,10	
*49	806,5	143,4	0,2	0,08	-0,12	n/d		æ	0,42	0,25	-0,17	
*50	807,2	144,6	n/d	-0,42	-	n/d	-		n/d	-	-	
51	672,7	87,8	n/d	0,16	-	111,7	111,72	0,02	n/d	2	2	

Tableau 9 : Présentation	des résultats de	la validation pour	· le débit de 7 m <sup>·</sup>	<sup>3</sup> /s
--------------------------	------------------	--------------------	--------------------------------	-----------------

	Station		Profondeur			Niveau			Vitesse		
				(m)			(m)			(m/s)	
No	x	у	mesurée	calculée	écart	mesuré	calculé	écart	mesurée	calculée	écart
1	1 150,4	-146,1	n/d	-	<u>.</u>	111,43	111,44	0,01	n/d	-	_
2	1 086,4	-1,1	n/d	191	(a)	111,62	111,58	-0,04	n/d	-	-
3	898,6	113,2	n/d	170	-	111,62	111,60	-0,02	0	0	0
4	638	54,1	n/d	Ξ.	-	111,79	111,92	0,13	0,4	0,28	-0,12
5	681,1	-89,9	n/d		-	111,97	112,04	0,07	n/d	-	_
6	631,2	-137,9	n/d	-	-	111,97	112,08	0,11	n/d	7.	-
7	530,3	-132,6	n/d	-	-	112,18	112,23	0,05	n/d	-	
*8	790,3	118	0	0,01	0,01	n/d	-	-	0	0,01	0,01
*9	791,7	120,1	0,20	0,11	-0,09	n/d	-	-	0,41	0,18	-0,23
*10	792,7	121,8	0,32	0,22	-0,10	n/d	-	-	0,77	0,41	-0,36
*11	793,8	123,5	0,42	0,35	-0,07	n/d	-	-	0,80	0,70	-0,10
*12	794,9	125,2	0,60	0,48	-0,12	n/d	-		0,77	0,94	0,17
*13	795,9	126,9	0,61	0,58	-0,03	n/d	-	-	0,92	1,05	0,13
*14	797	128,6	0,65	0,69	0,04	n/d	-	-	0,96	1,15	0,19
*15	798	130,3	0,75	0,79	0,04	n/d	-	_	1,06	1,17	0,11
*16	799,1	132	0,80	0,87	0,07	n/d	-	-	1,16	1,20	0,04
*17	800,2	133,7	0,88	0,93	0,05	n/d	-	-	1,22	1,20	-0,02
*18	801,2	135,3	0,93	0,98	0,05	n/d	-	-	1,22	1,19	-0,03
*19	802,3	137	1,00	0,99	-0,01	n/d	-	-	1,22	1,14	-0,08
*20	803,3	138,7	0,83	0,96	0,13	n/d	-	-	1,17	1,06	-0,11
*21	804,4	140,4	0,68	0,85	0,17	n/d	-	-	1,06	0,90	-0,16
*22	805,5	142,1	0,45	0,73	0,28	n/d	-	-	0,83	0,72	-0,11
*23	806,5	143,8	0,12	0,24	0,12	n/d	-	-	0,58	0,31	-0,27
24	806,9	144,4	0	0,03	0,03	n/d	-	-	0	0,16	0,16

Tableau 10 : Présentation des résultats de la validation pour le débit de 19 m<sup>3</sup>/s

## 3.4.4 Simulations hydrodynamiques d'un registre hydrologique étendu

Une fois le modèle hydrodynamique fonctionnel et validé, des simulations ont été effectuées pour dix débits, incluant les débits de validation, couvrant le registre hydrologique habituel de la rivière (voir à la section 3.2.3, page 29). Les débits simulés sont les suivants : 7, 12, 19, 25, 35, 43, 50, 60, 75 et 100 m<sup>3</sup>/s. Quelques uns de ces résultats (7, 25 et 100 m<sup>3</sup>/s) sont présentés en annexe. Les valeurs des vitesses et des profondeurs sont représentées sur ces images par des isosurfaces.

# **3.5** Pseudo-simulations hydrodynamiques (1-D)

Paradoxalement, la mise en œuvre, la calibration et l'utilisation du simulateur hydrodynamique unidimensionnel (1-D) qui accompagne et alimente PHABSIM en données, sont des tâches relativement complexes. En plus des nombreuses mesures hydrauliques requises sur le terrain, il faut choisir parmi les trois programmes présentés à la section 2.2.1 (page 8) le plus apte à simuler les niveaux et les vitesses à chaque section transversale. De plus, quel que soit le programme sélectionné, plusieurs options de paramétrisation sont encore possibles lesquelles peuvent conduire à des résultats divergents (Milhous 1994). La paramétrisation est donc très délicate et il faut bien comprendre l'hydrodynamique du milieu pour effectuer un choix judicieux. L'incertitude inhérente à la modélisation 1-D peut donc s'avérer importante en fonction de l'expertise hydraulique des opérateurs des programmes.

Dans ce contexte, l'approche qui a été privilégiée<sup>1</sup> dans cette recherche consiste, rappelonsle, à produire en 2D des résultats hydrodynamiques qui seront ensuite entachés d'une incertitude comparable à celle qui serait produite par une démarche semblable à PHABSIM. La

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> L'option d'alimenter les programmes 1-D en mesures directes comme le veut l'approche PHABSIM a été écartée en raison des implications logistiques. La possibilité d'injecter des pseudo-mesures extraites du modèle 2-D en respectant pour la suite le protocole PHABSIM a également été délaissée en raison des difficultés méthodologiques qu'une telle démarche supposait.

discrétisation des données en provenance du modèle 2-D est convertie à l'approche PHAB-SIM (transects) par interpolation. Plus précisément, il a été décidé de mener une étude de sensibilité à l'incertitude des variables hydrauliques obtenues d'un modèle 1-D. C'est ainsi que, plutôt que de simuler en 1-D les vitesses et les profondeurs à différents débits, ces valeurs ont été extraites directement des résultats des simulations 2-D. Dans un premier temps, l'influence du mode de discrétisation des données a été étudiée (distribution spatiale, densité) et par la suite, des erreurs sur les vitesses et sur les profondeurs ont été simulées aléatoirement afin d'examiner la sensibilité de PHABSIM aux erreurs sur les résultats produits par ses simulations.

# **3.5.1** Positionnement des noeuds de calcul utilisés dans les simulations de type PHABSIM

L'emplacement des transects PHABSIM et des noeuds de calcul (pseudo-points de mesures) sur ces transects a été déterminé à partir de la carte topographique du tronçon (figure 13) qui a été tracée à partir des données cueillies sur le terrain pour la modélisation hydrodynamique 2-D. Sur cette carte, les isosurfaces sont aux 25 cm. Selon la méthode de positionnement des transects présentée à la section 2.2.1.1 (page 9), des sections transversales ont été positionnées de façon à bien représenter la morphologie longitudinale du lit de la rivière. L'emplacement des noeuds de calcul sur ces transects a été choisi avec la même attention de sorte que le lit de la rivière représenté pour l'exercice PHABSIM est relativement conforme à celui du modèle numérique d'élévation utilisé par le modèle hydrodynamique 2-D. Évidemment, une perte de précision topographique accompagne cet exercice de réduction puisque le semis de point original se trouve maintenant représenté par des transects relativement espacés. Au total, 41 sections transversales et 592 noeuds de calcul forment la base de données du modèle unidimensionnel, soit en moyenne plus de 14 points par transects. Ceci correspond à une densité normale de points (Bovee 1982) quoiqu'un si grand nombre de transects soit rarement utilisé pour une démarche de type PHABSIM à cause des implications logistiques. L'emplacement de ces transects et noeuds de calcul est représenté à la figure 13.

La figure 14 montre l'organisation spatiale des cellules qui sous-tend la topologie PHAB-SIM. Ainsi, chaque noeud de calcul se trouve associé à l'aire d'une cellule qu'il représente et dont nous devons estimer la superficie.









#### 3.5.2 Extraction des données abiotiques du modèle 2-D

À toutes les stations PHABSIM, les valeurs de cote de lit, de vitesse et de profondeur ont donc été extraites par interpolation nodale des résultats des simulations hydrodynamiques bidimensionnelles. Les dimensions verticales (profondeur, niveau d'eau, topographie) ont été interpolées linéairement entre les noeuds-sommet de l'élément dans lequel le point se trouvait tandis que la valeur de la vitesse a été interpolée quadratiquement entre les six noeuds de l'élément. Dans l'optique de la poursuite de l'objectif 1 de la recherche, c.à.d., comparer les résultats obtenus avec une discrétisation des données de type PHABSIM (transects, cellules), les données abiotiques obtenues par interpolation ont été utilisées telles quelles sans ajout d'erreur. Les résultats aux noeuds du modèle unidimensionnel sont donc sensiblement les mêmes que ceux produits par le simulateur 2-D, au facteur d'incertitude près, ce qui permettra de comparer les deux modes de discrétisation d'habitat, soit la discrétisation par éléments finis et la division du domaine en cellules PHABSIM.

## 3.5.3 Génération d'erreurs sur les variables abiotiques produites en 1-D

Le deuxième objectif de la recherche, qui est axé sur l'influence des incertitudes sur les variables abiotiques du modèle 1-D, requérait de considérer un bruit ajouté aux données de base utilisées.

#### 3.5.3.1 Approche

Des erreurs aléatoires ont donc été ajoutées aux résultats extraits du modèle 2-D afin de tester la sensibilité d'une étude PHABSIM aux erreurs engendrées par son modèle hydrodynamique. Dans Bourgeois (1996) des erreurs avaient été simulées sur les mesures de vitesse et de profondeur prises sur le terrain. La méthode de génération d'erreurs aléatoires utilisée pour cette recherche était une technique de type Monte Carlo où les erreurs simulées suivent une loi normale. Le coefficient de variation utilisé était de 30% sur les vitesses et 10% sur les profondeurs. La conclusion de Bourgeois est que le modèle d'habitat PHABSIM n'est pas très sensible aux erreurs sur les prises de données. Morhardt (1986) a fait une étude semblable pour tester la sensibilité de la disponibilité d'habitat aux imprécisions des mesures de terrain et a il a également déduit que le modèle hydrodynamique IFG-4 de PHABSIM était peu sensible aux erreurs sur les mesures. En fait, ce n'est pas tant le modèle hydrodynamique qui est insensible aux erreurs sur les mesures que la forme intégrative de la méthode des aires pondérées utiles qui permet aux erreurs ponctuelles, positives et négatives, de s'annuler.

# 3.5.3.2 Génération d'erreurs sur les variables hydrauliques

Le nombre généré,  $Y_1$ , suit une loi normale centrée réduite en [0,1]. Il est ramené à une erreur sur la vitesse, V, d'écart-type  $\sigma$  avec l'équation 22. La vitesse modifiée par l'erreur est  $V_m$ .

(22) 
$$V_{w} = \sigma_{v}Y_{1} + V = V(C_{v}Y_{1} + 1)$$

(23) avec, 
$$\sigma_v = \overline{V} * C_v$$

où,

## $C_v$ = Coefficient de variation

L'utilisation d'un générateur de nombres aléatoires suivant une loi normale est motivée par le fait que la répartition des erreurs suit généralement une telle distribution. Il existe peu d'études sur la distribution des erreurs produites par un modèle unidimensionnel. Il serait toutefois intéressant de mieux connaître le biais (s'il y en a un) des erreurs produites par un modèle 1-D afin d'utiliser une autre distribution statistique plus appropriée le cas échéant. En effet, une erreur d'élévation du niveau d'eau pour une section transversale entraînera des erreurs de profondeur du même signe à chaque point de mesure de cette section et, quelquefois (méthode WSP), sur plusieurs sections. Par conséquent, ces erreurs sur les profondeurs affecteront directement les valeurs des vitesses simulées puisque le débit sur la section doit correspondre au débit simulé.

#### 3.5.3.3 Génération des nombres aléatoires

Le générateur de nombres aléatoires utilisé pour notre recherche distribue les erreurs normalement, selon l'approche de Law (1982). L'algorithme utilisé est le suivant :

1. Génération de deux nombres aléatoires  $X_1$  et  $X_2$  entre 0 et 1

2. Transformation :  $Y_1 = \sqrt{-2\ln(X_1)} * \cos(2\pi X_2)$  où  $Y_1$  est une variable N(0,1)

#### 3.5.3.4 Protocole d'analyse de sensibilité

En simulant un bruit sur les valeurs de profondeur et de vitesse aux noeuds de calcul PHABSIM, nous cherchions à reproduire l'incertitude des résultats qui peuvent être obtenus à la suite d'une modélisation unidimensionnelle. Normalement, si les données de terrain sont exactes et suffisantes, c.à.d. au moins trois couplets de profondeur et de vitesse, on peut s'attendre à obtenir des valeurs de niveau relativement précise (plus ou moins 10%). Par ailleurs, les erreurs sur les vitesses produites ne sont pas bien connues et des erreurs de l'ordre de 100% sont facilement envisageables (Elser 1976).

Les écarts-types sur les erreurs choisis pour le test de sensibilité sont donc de 10% sur les profondeurs et 30%, 50%, 70% et 100% pour les vitesses. Pour chaque débit simulé et pour chaque écart-type, 200 simulations de nombres aléatoires ont été réalisées et donc, 200 valeurs d'APU ont été calculées pour chaque débit et à chaque écart-ype. Comme il y a 10 débits de simulés et 4 scénarios d'erreurs d'étudiés, 8000 simulations de nombres aléa-toires ont été réalisées.

# 3.6 Modèle d'habitat

## **3.6.1** Préférences d'habitat du saumon atlantique

L'espèce prédominante dans la rivière Sainte-Marguerite est le saumon atlantique (Salmo salar). Le saumon atlantique est une espèce de poisson qui retourne frayer dans sa rivière natale après une croissance en mer de 1 à 3 ans. Ceci explique les différences génétiques que l'on retrouve entre des saumons atlantiques provenant de rivières différentes (Bley 1987). Par conséquent, les courbes de préférence d'une même espèce peuvent varier d'un cours d'eau à l'autre. Puisqu'il n'y a pas encore de courbes de préférence développées pour le saumon de la rivière Sainte-Marguerite, les courbes utilisées pour cette recherche sont celles du saumon de la rivière Moisie (Boudreault et al. 1989) laquelle, à l'instar de la rivière Sainte-Marguerite, supporte une population de gros saumons. Les disponibilités d'habitat (Aires Pondérées Utiles ou APU) que l'on va ainsi obtenir sur la rivière Sainte-Marguerite pourront donc différer d'un résultat qui aurait été produit avec les courbes développées spécifiquement pour cette rivière. Comme l'exercice de cette recherche vise à effectuer l'analyse comparative de deux méthodes de calcul des microhabitats et que le modèle de préférence n'est pas mis en cause directement, il a été convenu de restreindre nos conclusions à l'aspect comparatif des résultats et à limiter l'interprétation de la valeur d'habitat calculée.

Le cycle de vie du saumon atlantique comporte plusieurs phases, particulièrement les jeunes stades, où le poisson est plus sensible aux différents facteurs abiotiques qui l'entourent. Ainsi, la fraie, l'incubation des œufs, l'alevinage et le taconage sont des stades qui dépendent grandement de la valeur et de la disponibilité de bons habitats. Pour cette recherche, le stade choisi est celui d'alevin qui correspond au premier été suivant l'éclosion. La raison de ce choix est l'étroitesse de sa gamme de préférences pour la vitesse, c'est à dire, une plus grande sélectivité. Ainsi, les variations de vitesse se feront plus fortement sentir dans le calcul des APU et devraient faire ressortir plus nettement l'influence des incertitudes du modèle hydrodynamique employé. Les courbes de préférences de l'alevin pour la vitesse et la profondeur sont présentées respectivement aux figures 15 et 16. Ces courbes ont été développées à la suite d'observations de l'alevin sur la rivière Moisie en 1988. Au total, 126 alevins ont été observés en plongée et les variables physiques (vitesse, profondeur et substrat) ont été mesurées en chacun de ces points. La proportion des alevins observés a été pondérée par rapport aux conditions physiques présentes sur le site afin de convertir les courbes d'utilisation en courbes de préférence. La méthode complète est disponible dans Boudreau *et al.* (1989) et Leclerc *et al.* (1995)



Figure 15 :Courbe de préférence d'habitat des alevins du saumon atlantique de la rivière Moisie en fonction de la vitesse (d'après Boudreau *et al.* 1989)



Figure 16 :Courbe de préférence d'habitat des alevins du saumon atlantique de la rivière Moisie en fonction de la profondeur (d'après Boudreau *et al.* 1989)

Pour évaluer la valeur d'habitat de l'assemblage granulométrique en un point, la procédure adoptée par Leclerc *et al.* a été retenue. Cette méthode tient compte du nombre de classes de granulat présentes localement, exprimé par l'indice de diversité  $I_D$ , et de l'importance relative de chacune de ces classes. En effet, plus l'assemblage granulométrique est diversifié, plus il est adéquat pour les activités liés à l'alimentation et à la reproduction. S'il y a trois classes de substrat présentes dans un secteur, l'indice lié à la diversité sera égal à un. Toutefois, cet indice prend respectivement des valeurs de 0,66 et 0,33 s'il n'y a que deux ou une classe de substrat dans ce secteur. L'équation utilisée pour l'évaluation de l'indice de base pour le substrat,  $I_s$ , est la suivante :

[24]  $I_s = I_D \times s_1 \times s_2 \times s_3$ 

Les valeurs des sous-indices  $s_i$  de rang *i* sont présentées au tableau 11. Le rang est déterminé par l'importance de la classe de granulat dans l'assemblage, c'est à dire que si le sable occupe la plus grande superficie dans l'assemblage il sera au premier rang.

Classe de granulat		Rang					
	1	2	3				
Sable	0,25	0,5	0,75				
Gravier	0,75	1	1				
Caillou	1	1	1				
Galet	1	1	1				
Blocs	0,5	0,75	1				

Tableau 11 :Système de classification du substrat pour l'alevin du saumon atlantique de la rivière Ashuapmushuan : valeurs des sous-indices s<sub>i</sub> (d'après Leclerc *et al.* 1995)

# 3.6.2 Calcul de la disponibilité d'habitat

L'indice de préférence est calculé à chaque noeud et pour chaque simulation de façon indépendante. L'APU est le résultat de l'intégration de ces indices sur les éléments et les cellules à un débit donné. La méthode d'intégration des indices pour le calcul des APU a déjà été décrite à la section 2.2.4.3 (page 20), et les courbes de préférences utilisées pour cette étude ont été introduites à la section précédente. Les résultats de cette étape seront présentés et discutés au prochain chapitre.

62

Le présent chapitre présente les différents résultats obtenus en fonction des objectifs de la recherche. D'abord, l'influence du mode de discrétisation de l'habitat sur les résultats de disponibilité d'habitat (APU) a été analysée. Une analyse de sensibilité des APU aux erreurs de vitesse et de profondeur produites normalement par le simulateur hydrodynamique de PHABSIM (section 3.5, page 51) a ensuite été réalisée afin de reproduire l'incertitude de ces résultats qui n'ont pas été simulés. Enfin, une analyse qualitative ayant pour objet les efforts de terrain requis, la facilité d'utilisation des logiciels, la calibration des modèles hydrodynamiques et leur potentiel d'utilisation dans différents cours d'eau a été conduite.

# 4.1 Influence du mode de discrétisation de l'habitat

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, l'organisation spatiale des données est différente pour les modélisations 1-D et 2-D. Les deux méthodes sont présentées aux sections 2.2.1.1 page 9 et 2.2.2.2 page 16. Les figures 12 et 14 (pages 45 et 55 respectivement) montrent les différences fondamentales existant entre l'approche 2-D en éléments finis et l'approche 1-D en cellules PHABSIM. On peut également se référer aux figures 17 et 18 qui montrent les surfaces d'habitats disponibles pour l'alevin à 35 m<sup>3</sup>/s cartographié selon PHABSIM et HABIOSIM respectivement. Les classes de couleur indiquent les différentes qualités de l'indice d'habitat. A première vue, il apparaît que la tendance générale de la distribution d'habitats dans le tronçon est conforme dans les deux approches, ce qui n'est pas surprenant puisque l'hydrodynamique des deux méthodes est de même provenance. Il est notable cependant que les contours des bons habitats sont nettement mieux définis dans la version 2-D. Dans certain cas, l'approche 1-D ne parvient pas à capter la présence d'îles pourtant importante en superficie.








La surface totale du tronçon couverte par les éléments d'HABIOSIM est de 64 452 m<sup>2</sup> tandis que la surface couverte par les cellules est de 63 653 m<sup>2</sup>, soit une différence de 799 m<sup>2</sup>. La méthode par transect utilisé dans PHABSIM suppose que les variations longitudinales de la rivière sont beaucoup moins importantes que les variations latérales. Ce n'est toutefois pas toujours le cas. Dans cette section, la perte de précision occasionnée par cette simplification des données a été analysée.

On retrouve à la figure 19 les courbes d'APU pour alevins en fonction du débit selon PHABSIM et HABIOSIM. Comme il a été déjà mentionné, les valeurs des variables physiques aux noeuds de PHABSIM ont été extraites des résultats des simulations 2-D (section 3.5.2 page 56). Les différences entre les APU calculées, qui vont de 23% pour le débit de 7 m<sup>3</sup>/s à 9% au débit de 100 m<sup>3</sup>/s, sont donc seulement causées par la perte de précision due au mode de discrétisation des données puisqu'il s'agit du seul facteur distinguant les deux approches. La première remarque qu'il est possible de faire sur l'allure de ces courbes est que l'APU totale est toujours plus élevée d'après le modèle de PHABSIM. Ceci s'explique par le fait que PHABSIM ne capte pas bien les berges qui ont une qualité d'habitat nulle. Elle attribut donc aux berges une valeur représentative d'un écoulement où les conditions d'habitat sont passablement meilleures.

On remarque également sur la figure 19 que la courbe d'HABIOSIM montre clairement une baisse temporaire dans la qualité des habitats à 35 m<sup>3</sup>/s. Cette différence n'est pas observable sur la courbe de PHABSIM. Pour comprendre la présence de deux optimums dans les simulations 2-D, on doit être conscient que plusieurs combinaisons d'indices et de surfaces peuvent donner une même valeur d'APU totale. Par exemple, vingt-cinq pourcent de la surface avec un indice global de 1,0 va donner le même résultat final que cent pourcent de la surface avec un indice de 0,25. C'est un peu ce qui se passe sur la courbe d'HABIOSIM lorsque l'on retrouve un deuxième optimum. Les surfaces présentes dans chaque classe d'indice, selon HABIOSIM, pour les débits correspondant au premier maximum local (19 m<sup>3</sup>/s), au minimum local (35 m<sup>3</sup>/s) et au deuxième maximum local (43 m<sup>3</sup>/s), sont illustrées sur l'histogramme de la figure 20. On peut voir sur ce graphique qu'il y a plus de mauvais

habitats à 19 m<sup>3</sup>/s qu'à 43 m<sup>3</sup>/s. Ceci s'explique par la présence de plus de berges découvertes (profondeur d'eau inférieure à 0) à 19 m<sup>3</sup>/s et donc, plus d'habitats de qualité nulle. Il y a également plus de très bons habitats au débit de 19 m<sup>3</sup>/s, c'est à dire des habitats où l'indice global est plus grand que 0,6. Toutefois, il y a plus d'habitats entre 0,3 et 0,6 au débit de 43 m<sup>3</sup>/s et ceci compense pour le manque de très bons habitats à ce débit. En fin de compte, l'APU totale est sensiblement la même aux deux débits. Au débit de 35 m<sup>3</sup>/s, on se trouve dans un état intermédiaire où le surplus d'habitats médiocres ne compense pas la perte de très bons habitats.

Avec le mode de discrétisation de PHABSIM, cette baisse d'habitats à 35 m<sup>3</sup>/s n'est pas captée. Ceci peut également être expliqué par le fait que la surface totale d'habitats disponibles dans chaque classe n'est pas la même que pour HABIOSIM. On retrouve à la figure 21 l'histogramme des surfaces dans chaque classe d'indice pour PHABSIM et HABIOSIM au débit de 35 m<sup>3</sup>/s. Cette figure nous permet de constater qu'HABIOSIM capte mieux les habitats de qualité nulle près des berges. On peut donc conclure que les subtilités ne sont pas bien captées par la discrétisation de type PHABSIM. Toutefois, la perte de précision au niveau de la discrétisation du modèle hydrodynamique 1-D ne justifie pas à elle seule son remplacement par un modèle hydrodynamique 2-D. Il serait en effet possible de tirer les mêmes conclusions de gestion hydrologique (ex : débit minimum réservé de 19 m<sup>3</sup>/s) à partir des courbes de PHABSIM et d'HABIOSIM présentées à la figure 19.



Figure 19 :Courbes des APU en fonction du débit selon PHABSIM et HABIOSIM



Figure 20 :Surface présente dans chacune des classes d'indice pour les simulations avec HABIOSIM de 19 m<sup>3</sup>/s, 35 m<sup>3</sup>/s et 43 m<sup>3</sup>/s



Figure 21 :Comparaison des surfaces présentes dans chaque classe d'indice pour PHABSIM et HABIOSIM à un débit de 35 m<sup>3</sup>/s

# 4.2 Analyse de sensibilité à l'incertitude des variables abiotiques

Le but du test d'analyse de sensibilité à l'incertitude des variables abiotiques était de vérifier l'effet de cette incertitude sur la disponibilité d'habitat. Comme mentionné à la section 3.5.3 (page 56), on a supposé que le coefficient de variation de l'incertitude sur la profondeur était de 10 % tandis que le coefficient de variation sur les vitesses prenaient les valeurs de 30 %, 50 %, 70% et 100 %. Le graphique de la figure 22 montre les quatre courbes d'APU en fonction du débit qui résultent de ce test. La valeur d'APU utilisée pour tracer ces courbes est la moyenne des 200 valeurs d'APU calculées pour chacune des valeurs de coefficient de variation d'incertitude sur la vitesse.

On peut voir sur ces courbes que plus l'imprécision sur les vitesses est grande, plus la valeur d'APU calculée à un débit donné est faible. Ceci s'explique par le fait que la probabilité de simuler une valeur de vitesse dans l'optimum de la courbe de préférence est plus faible que de la simuler sur le reste du registre. Autrement dit, l'ajout d'une erreur a pour effet de projeter la valeur de la variable hors du registre optimal plus souvent à mesure que l'écart-type de cet erreur augmente. Il en résulte un abaissement progressif de la disponibilité de bons habitats. Les classes de valeur d'habitat se diffusent l'une dans l'autre au détriment de la classe centrale contenant la plus grande proportion d'habitat optimal.

Les tableaux 12 à 15 présentent quelques statistiques sur les APU calculées pour chaque simulation d'erreurs sur les vitesses et pour chaque débit du registre. On remarque en examinant la plage des valeurs d'APU calculées que l'incertitude du résultat croît avec le débit et le coefficient de variation de l'erreur sur la vitesse. Par conséquent, si on avait utilisé des valeurs d'APU aléatoirement parmi les 200 simulations pour construire la courbe plutôt que la valeur moyenne de toutes les APU calculées, la courbe d'APU en fonction du débit obtenue aurait pu être différente.

Ainsi, le graphique de la figure 23 montre la marge d'incertitude aléatoire dans les APU résultant d'une erreur de 30% sur les vitesses et de 10% sur les profondeurs. L'effet de cet incertitude pourrait faire dévier l'interprétation du débit procurant la valeur maximale d'APU et par conséquent, la recommandation de débit réservé dans un contexte de gestion

Le graphique de la figure 24 présente trois histogrammes des valeurs d'APU calculées pour trois écarts-types différents à un débit de 7 m<sup>3</sup>/s. Le nombre de simulations dans chacun des histogrammes est toujours de deux cents. On remarque que plus l'écart-type sur la vitesse est grand et plus la distribution des valeurs d'APU devient évasée. Ceci confirme que l'incertitude du résultat calculé croît avec l'augmentation des erreurs sur les vitesses simulées. Cette analyse montre le danger potentiel que existe d'utiliser des résultats hydrodynamiques imprécis pour déterminer la valeur d'un débit réservé dans un contexte de gestion.



Figure 22 :Courbes des APU (valeur moyenne) en fonction du débit pour les quatre simulations d'erreurs sur les vitesses aux noeuds de PHABSIM. L'écarttype de l'erreur sur la profondeur est toujours égal à 10%.



Figure 23 :Courbe de la valeur moyenne d'APU en fonction du débit pour une erreur sur les vitesses de 30%. La barre d'erreur pour chaque valeur indique la valeur minimum et maximum de l'échantillon de valeurs d'APU simulées.



Figure 24 :Répartition des APU calculées au débit de 7 m<sup>3</sup>/s pour trois écarts-types sur l'erreur des vitesses selon PHABSIM

Tableau 12 :Statistiques sur les valeurs d'APU calculées à	partir des simulations
d'erreurs sur les vitesses : écart-type de 30%	

Débit (m³/s)										
	7	12	19	25	35	43	50	60	75	100
Moyenne	27933	30239	32028	31973	30904	30486	29191	27176	25014	22136
Médiane	27935	30238	32028	31986	30918	30470	29207	27165	25033	22142
Plage	581	998	1265	1364	1435	1518	1641	1779	1944	1936
Minimum	27610	29784	31425	31301	30219	29799	28484	26374	24155	21307
Maximum	28191	30782	32690	32666	31655	31317	30125	28153	26099	23243
Écart-type	115	140	188	220	266	298	324	350	372	387

Débit (m³/s)										
	7	12	19	25	35	43	50	60	75	100
Moyenne	27081	29144	30700	30611	29563	29145	27068	26083	24211	21751
Médiane	27086	29151	30707	30612	29568	29129	27049	26071	24205	21759
Plage	1107	1536	1945	2130	1995	2141	937	2753	2851	2491
Minimum	26508	28423	29806	29578	28583	28155	26544	24540	22648	20444
Maximum	27615	29960	31751	31708	30578	30295	27481	27293	25499	22935
Écart-type	193	228	290	330	376	411	180	501	510	515

Tableau 13 :Statistiques sur les valeurs d'APU calculées à partir des simulationsd'erreurs sur les vitesses : écart-type de 50%

Tableau 14 :Statistiques sur les valeurs d'APU calculées à partir des simulationsd'erreurs sur les vitesses : écart-type de 70%

Débit (m³/s)										
	7	12	19	25	35	43	50	60	75	100
Moyenne	26355	28130	29429	29281	28216	27791	26582	24924	23232	21097
Médiane	26362	28132	29436	29292	28215	27799	26582	24889	23220	21147
Plage	1220	1716	2190	2169	2814	2691	3312	3560	3948	3957
Minimum	25715	27430	28411	28219	26735	26559	24829	22983	21075	18929
Maximum	26935	29145	30601	30388	29549	29250	28141	26542	25023	22886
Écart-type	249	295	367	409	474	489	583	609	620	619

Tableau 15 :Statistiques sur les valeurs d'APU calculées à partir des simulations d'erreurs sur les vitesses : écart-type de 100%

Débit (m³/s)										
	7	12	19	25	35	43	50	60	75	100
Moyenne	25708	27088	28005	27750	26603	26168	25030	23511	22000	20110
Médiane	25703	27094	28014	27745	26633	26211	24971	23480	21991	20118
Plage	1682	2274	2796	3004	3289	3266	3093	3210	3028	3203
Minimum	24863	26141	26633	26001	24791	24582	23686	21972	20553	18698
Maximum	26545	28415	29430	29005	28080	27848	26779	25182	23581	21902
Écart-type	318	380	465	509	556	590	676	682	672	652

### 4.3 Discussion sur les méthodologies PHABSIM et HA-BIOSIM

#### 4.3.1 Besoins de caractérisation du domaine étudié

Quel que soit le modèle de simulation hydrodynamique sur un tronçon, il est nécessaire de l'alimenter en données de base. La topographie de la rivière est sans contredit l'information la plus importante et la densité d'information à ce sujet ne peut qu'accroître la précision des résultats obtenus. De plus, dans la plupart des cours d'eau, cette information ne requiert pas un grand effort de terrain. Ainsi, il est possible pour une équipe entraînée de mesurer près de 1000 points par jour à l'aide d'une station totale.

Dans une simulation hydrodynamique 2-D, il n'y a pas de limite, sauf le risque de redondance, quant à la densité de points topographiques pouvant être mesurés. Par contre, dans une simulation hydrodynamique 1-D, la densité de points affecte directement le facteur temps dès les premières étapes de modélisation. En effet, à chaque point de mesure de la topographie, on doit habituellement obtenir une valeur de vitesse et de profondeur, ce qui augmente rapidement l'effort investit proportionnellement au nombre de noeuds de calcul.

De plus, puisque les valeurs de vitesse et de profondeur sont fonctions du débit, il est important de connaître précisément le débit au moment de la cueillette de données. Comme la période de mesure sur le terrain s'étale normalement sur plusieurs jours, il y a de fortes chances que le débit ait fluctué. Il faut donc traiter chaque section indépendamment ou encore, ramener les valeurs mesurées à un débit commun si c'est possible.

La connaissance précise de l'emplacement de chaque section et de chaque point de mesure est également nécessaire en 1-D. En effet, les mesures prises à différents débits (un minimum de 3 débits sur l'ensemble du registre) doivent être effectuées au même endroit pour permettre de développer les relations empiriques à ces noeuds de calcul ou pour ces transects. Comme la distribution des vitesses sur une section transversale est élaborée à partir d'une régression ou d'une interpolation des données disponibles, il est important d'avoir suffisamment de mesures pour tous les points et sur tout le registre de débit à modéliser. Il est toutefois difficile de satisfaire à cette exigence puisque les mesures de vitesse et de profondeur sont plus difficiles à prendre lorsque le débit est élevé. Par conséquent, pour les berges qui ne sont inondées qu'en période de crue on ne possède généralement pas de données de base (Ghanem 1994).

Le tableau 16 résume les différents besoins de caractérisation du domaine étudié pour PHABSIM et HABIOSIM.

\_\_\_\_\_

	Topographie	Vitesse	Niveau	Substrat
PHABSIM	Selon des tran- sects précis	A tous les points et pour 3 débits minimum	A tous les points et pour 3 débits minimum	A tous les points
HABIOSIM	Semi de points aléatoires	Quelques points pour la validation	Quelques points pour la validation	Observation visuelle de la distribution

Tableau	16:	Besoins d	e caractérisation	pour	r PHABSIM et HABIOSIM	L
---------	-----	-----------	-------------------	------	-----------------------	---

La souplesse d'HABIOSIM quant à l'emplacement des points de mesure permet une meilleure représentation du domaine étudié alors que la tendance avec PHABSIM est d'avoir une sur-caractérisation transversale et une sous-caractérisation longitudinale (Ghanem 1994). D'autre part, HABIOSIM puise ses données dans le modèle numérique de terrain (MNT) ce qui lui confère une grande souplesse quant à la densité d'information pouvant y être introduite ou extraite. Il a même été possible d'alimenter directement PHABSIM avec les données d'HABIOSIM alors que le contraire aurait été difficile à réaliser.

#### 4.3.2 Facilité d'utilisation des programmes et logiciels

L'utilisation de PHABSIM demande une grande expertise du programme de calcul. Malgré la disponibilité d'un manuel de référence relativement complet, il est difficile de produire le format de fichier nécessaire, faire un choix parmi les programmes disponibles (section 2.2.1, page 8) et satisfaire les exigences de la méthode. Un exemple de ces exigences est la recommandation d'avoir une section critique à l'aval lors de l'utilisation de la méthode des courbes de remous. En plus, pour un tronçon, il est parfois recommandé d'utiliser simultanément plusieurs programmes et/ou de les alterner pour la simulation des niveaux d'eau à différents transects ou à différents débits.

C'est la simplicité du modèle hydraulique utilisé qui, paradoxalement, complique son utilisation. C'est la pauvreté du modèle, lequel ne considère que la gravité et le frottement (négligeant les accélérations convectives, les cisaillements, etc...), qui en rend difficile la calibration. Il est toujours préférable d'utiliser un modèle conceptuellement plus riche, surtout si ce choix ne nécessite pas d'apport de données additionnel. Dans ce cas-ci, les données nécessaires pour effectuer une simulation hydraulique 2-D sont moindres que pour une simulation hydraulique 1-D.

Ainsi, pour ce qui est de l'utilisation du logiciel servant aux simulations hydrodynamiques 2-D, l'approche est totalement différente. Il n'y a qu'une manière d'effectuer une simulation, c'est à dire qu'il n'y a qu'un seul programme qui effectue la simulation de tous les variables physiques. Les principes mathématiques qui sous-tendent les écoulements sont basés sur des équilibres naturels de force et de masse (modèle de Saint-Venant), lesquels considèrent toutes les composantes présentes dans le milieu. De plus, les équilibres sont assurés simultanément sur l'ensemble su site. L'interface du logiciel (MODELEUR, HYDROSIM) est maintenant bien développée et il n'est plus nécessaire d'utiliser plusieurs programmes séparément pour effectuer le maillage, les simulations hydrodynamiques et la cartographie des résultats. Il est toutefois important de mentionner que pour la simulation hydrodynamique 2-D, et contrairement aux simulations 1-D, un support technique était disponible en permanence. Pour cette raison, il est possible que la tâche ait paru plus facile.

#### 4.3.3 Calibration des modèles hydrodynamiques

Dans le cas du modèle hydrodynamique 1-D, l'effort de calibration dépend du programme utilisé, IFG-4, WSP ou MANSQ. Une description de ces programmes a été présentée à la section 2.2.1 (page 8). Comme le processus de simulation hydrodynamique à partir des programmes de PHABSIM s'est arrêté avant l'étape de calibration, il nous est impossible de fournir ici une opinion personnelle à ce sujet. Par contre, selon Petts et Maddock (1994), le choix du bon programme et sa calibration peuvent prendre beaucoup de temps et correspondent à l'étape la plus difficile dans un projet de modélisation. D'après Waddle (1996) qui a fait une étude comparant un modèle hydrodynamique 2-D aux programmes de PHABSIM, le modèle hydrodynamique 2-D semble nécessiter une calibration moindre et requérir moins d'intervention de l'utilisateur pour des résultats équivalents.

La calibration du modèle hydrodynamique bidimensionnel se limite à l'ajustement des coefficients de rugosité et du paramètre de viscosité turbulente. Lorsque les assemblages granulométriques présents sur le site sont connus, le logiciel évalue par lui même une valeur du coefficient de rugosité (équation 18). Il y a donc rarement des modifications à apporter aux valeurs du coefficient de rugosité. Nous avons vu dans le cadre de cette recherche que les vitesses mesurées n'ont servi qu'aux fins de la validation.

#### 4.3.4 Versatilité des modèles hydrodynamiques

La qualité première d'un modèle hydrodynamique versatile est son aptitude à simuler aisément l'hydrodynamique de n'importe quel type de cours d'eau. C'est le cas en modélisation hydrodynamique 2-D ; les méandres et les îles ne posent aucun problème particulier. Il s'agit de bien les décrire lors des relevés topographiques. Or, pour réaliser une simulation hydrodynamique 1-D, il faut traiter séparément chaque côté de l'île. Il faut donc connaître le plus, cette étape est critique dans le cheminement puisqu'un mauvais choix de programme ou d'option peut conduire à des résultats aberrants.

Du point de vue de la versatilité d'application des modèles hydrodynamiques, la modélisation hydrodynamique 2-D est nettement supérieure puisqu'elle n'impose pas de contrainte quant aux champs d'applications de la méthode sauf dans des situations très complexes (courants secondaires dominants) où une modélisation tridimensionnelle devient préférable. Ce n'est évidemment pas le cas pour la modélisation hydrodynamique unidimensionnelle puisque par définition elle suppose que l'écoulement se fait dans la direction des cellules. Les courants convergeants et divergeants ne peuvent être pris en compte que par des artifices paramétriques et dans ces cas, la fiabilité des résultats ne peut être assurée. Il en est de même pour les îles ou les méandres prononcés qui doivent être traités comme des cas particuliers. Le modèle hydrodynamique 2-D permet donc de modéliser une plus grande gamme de situations réalistes, incluant les conditions non-stationnaires.

Un aspect plus appliqué de notre recherche portait sur le gain de précision apporté par la densité de points de calcul qui est plus élevée en modélisation 2-D et le mode d'interpolation qui est offert par la méthode des éléments finis. Comme on pouvait s'y attendre, le résultat d'aires pondérées utiles est peu influencé par la densité d'informations puisqu'un surplus d'habitats favorables estimé dans un secteur est facilement compensé par une dévaluation de l'habitat ailleurs sur le tronçon. En fait, on a cependant obtenu des écarts d'APU allant de 9% à 23%, des différences qui ne modifieraient toutefois pas les prises de décision par un gestionnaire dans le choix d'un débit réservé. Par ailleurs, si ces différences sont d'un intérêt secondaire pour un utilisateur oeuvrant dans ce contexte, le raffinement offert par un modèle 2-D basé sur la méthode des éléments finis peut être nécessaire dans des situations d'aménagement requérant une cartographie précise des habitats.

Dans un même ordre d'idée, il est également décevant de se rendre compte que les valeurs de vitesse produites par le modèle hydrodynamique ont peu d'influence sur le résultat final d'aire pondérée utile. La grossièreté de la courbe de préférence pour les vitesses et çon où 25% de la surface possède de très bons habitats et le reste de la surface est occupé par des habitats de qualité nulle. Il serait peut-être nécessaire d'améliorer le modèle biologique afin de le rendre plus sensible aux différents scénarios. Il serait également intéressant de tester davantage les résultats hydrodynamiques des deux modèles afin de mieux connaître la fiabilité de ces résultats et le biais s'il en existe un. Dans un tel cas, où il y aurait un biais systématique dans la répartition des erreurs sur les vitesses ou une autocorrélation spatiale des erreurs produites, on pourrait simuler les erreurs avec une distribution autre que celle de la loi normale.

Enfin, afin de pousser plus loin les recherches sur la qualité de l'habitat piscicole, la modélisation hydrodynamique bidimensionnelle basée sur la méthode des éléments finis est un outil qui offre beaucoup plus de latitude puisqu'il est très simple de manipuler les données et de simuler différents aménagements. Dans un cas d'aménagement alternatif (modification topographique ou du substrat), l'approche 1-D serait impuissante à prédire l'évolution de la disponibilité d'habitat alors que l'approche 2-D permettrait d'y arriver aisément.

#### 6. **BIBLIOGRAPHIE**

- Beaulieu, C. et G. Dion. (1991). Étude sédimentologique dans le but de protéger les habitats du saumon de l'Atlantique et augmenter la productivité de la rivière Sainte-Marguerite. 72 p.
- Bley, P.W. (1987). Age, Growth, and mortality of juvenile Atlantic salmon in streams : a review., U.S. Fish and Wildlife Service, Biol. Rep. 87(4). 25p.
- Boudreau, P., M. Leclerc, et G. R. Fortin. (1994). Modélisation hydrodynamique du lac Saint-Pierre, fleuve Saint-Laurent: l'influence de la végétation aquatique. *Revue Canadienne de Génie Civil* 21(3) : 471-489.
- Boudreau, P., G. Bourgeois, M. Leclerc, A. Boudreault et L. Belzile. (1996). Two dimensional habitat model validation based on spatial fish distribution: application to juvenile Atlantic salmon of Moisie river. Dans Comptes-rendus du deuxième Symposium international de l'AIRH sur l'hydraulique et les habitats-Écohydraulique 2000, M. Leclerc et al Eds Volume B 365-380. Québec, Juin 1996.
- Boudreault, A., M. Leclerc. J.F. Bellemare, and G. Shooner (1989). Étude des répercussions du détournement de la rivière Aux Pékans sur les habitats salmonicoles de la rivière Moisie. Rapport de Gilles Shooner et Associés à la Direction de l'Environnement d'Hydro-Québec, Québec.
- Bourgeois, G.,D. Caissie et N. El-Jabi. (1996). Sensitivity Analysis of PHABSIM in a small Atlantic salmon stream. Dans Comptes-rendus du deuxième Symposium international de l'AIRH sur l'hydraulique et les habitats-Écohydraulique 2000, M. Leclerc et al Eds Volume B 381-394. Québec Juin 1996.
- Bovee, K. D. (1982). A guide to stream habitat analysis using the Instream Flow Incremental Methodology. *Instream Flow Information Paper No 12, U.S. Fish and Wildlife Service, FWS/OBS 82/26.* Fort Collins, Colorado. 248 p.
- Bovee, K.D. et R.T. Milhous. (1978).Hydraulic simulation in instream flow studies: theory and techniques. *Instream Flow Information Paper No.5, U.S. Fish and Wildlife Service, FWS/OBS-78/33*. Fort Collins, Colorado. 130 p.
- Bovee, K.D. (1986).Development and evaluation of habitat suitability criteria for use in the Instream Flow Incremental Methodology. *Instream Flow Information Paper No.21*, U.S. Fish and Wildlife Service, FWS/OBS-86/7. Fort Collins, Colorado. 343 p.

- Bovee, K.D. et R.T. Milhous. (1978). Hydraulic simulation in instream flow studies: theory and techniques. *Instream Flow Information Paper No.5*, U.S. Fish and Wildlife Service, *FWS/OBS-78/33*. Fort Collins, Colorado. 130 p.
- Bozek, M. A. et F. J. Rahel. (1992). Generality of microhabitat suitability models for young Colorado river Cutthroat trout (Oncorhynchus Clarki Pleuriticus) across sites and among years in Wyoming streams. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 49(3): 552-564.
- Butler, D. (1979. Stream evaluation project : Phase II-Texas. Instream Flow Serv. Grp., U.S. Fish and Wildlife Service W/IFG-79/W112. Fort Collins, Colorado.
- Chow, V.T. (1959). Open channel hydraulics. McGraw-Hill, New York, 680 p.
- Dhatt, G. et G. Touzot. (1981). Une présentation de la méthode des éléments finis. Presse de l'Université Laval, Québec et Maloine, Paris, 543 p.
- Elser, A.A. (1976). Use and reliability of water surface profile program data on a Montana prairie stream. Dans Proc. Symp. And Speciality Conf. on Instream Flow Needs J.F. Orsborn and C.H. Allman, Eds., Vol II. 496-540. Bethesda, MD.
- Gan, K. et T. McMahon.(1990). Variability of results from the use of PHABSIM in estimating habitat area. *Regulated Rivers: Research and Management*, 5(3):233-239.
- Ghanem, A., P. Steffler, F. Hicks, et S. J. ed. Saltveit. (1994). Two-dimensional finite element flow modeling of physical fish habitat. Page 84-89 dans Proceeding of the 1<sup>st</sup> International Association for Hydraulic Research Symposium on Habitat Hydraulics, Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway.
- Hilgert, P. (1982). Evaluation of instream methodologies for fisheries in Nebraska. Nebraska Tech. Ser. 10. Nebraska Game Parks Commission, Lincoln.
- Jowett, I. (1992). Models of the abundance of Large Brown trout in New-Zealand rivers. North American Journal of Fisheries Management 12: 417-432.
- Law, A.M. (1982) Simulation modeling and analysis. McGraw-Hill Inc., New York.
- Leclerc, M., G. Dhatt, J.L. Robert, J.C. Tessier, A. Tessier et Y. Matte. (1987). Modélisation des écoulements de l'Archipel de Montréal par éléments finis : aspects divers de l'application. *Revue Internationale des Sciences de l'Eau*. 3 : 41-56.
- Leclerc, M., J. F. Bellmare, et S. Trussard. (1990). Simulation hydrodynamique de l'estuaire supérieur du fleuve Saint-Laurent (Canada) avec un modèle aux éléments finis couvrantdécouvrant. Canadian Journal of Civil Engineering, 17(5):739-751.

- Leclerc, M., P. Boudreau et L. Belzile. (1991). Aménagement hydroélectrique de l'Ashuapmushuan. Avant-Projet, phase 1. Étude environnementale de la faune ichtyenne. Volume 3 : Modélisation numérique des habitats de la ouananiche d'un tronçon représentatif de la rivière Ashuapmushuan (km 68). Rapport de l'Institut National de la Recherche Scientifique-Eau No R-316 et du Groupe Environnement Shooner Inc., pour la Vice-Présidence Environnement, Hydro-Québec, Montréal, 76 p., 4 annexes.
- Leclerc, M., P. Boudreau, J. Bechara, L. Belzile et D. Villeneuve. (1994). Modélisation de la dynamique de l'habitat des Ouananiches (*Salmo Salar*) juvéniles de la rivière Ashuapmushuan (Québec, Canada). Bulletin Français De La Pêche Et De La Pisciculture, (332): 11-32.
- Leclerc, M., A. Boudreault, J. A. Bechara, et G. Corfa. (1995). Two-dimensional hydrodynamic modeling: a neglected tool in the Instream Flow Incremental Methodology." *Transactions of the American Fisheries Society*, 124(5): 645-662.
- Mathur, D., W. H. Bason, E. J. J. Purdy, et C. A. Silver. (1985). A critique of the Instream Flow Incremental Methodology. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 42(4): 825-831.
- Milhous, R. T., M. A. Updike, et D. M. Schneider. (1989). *Physical habitat simulation* system reference manual- Version II. Fort Collins, CO : Biol.-Rep.-U.S.-Fish-Wildl.-Serv.
- Morhardt, E. (1986). Instream flow methodologies. Research Project 2194-2. Prepared for Electrical Power Research Institute, by EA Engineering, Science, and Technology, Inc., Lafayette.
- Nehring, R.B. (1979). Evaluation of instream flow methods and determination of quantity needs for streams in the state of Colorado. *Colo. Div. Wildl. for U.S. Fish and Wildlife Service*. Fort Collins, Colorado
- Orth, D. J. (1987). Ecological considerations in the development and application of instream flow-habitat models. *Regulated Rivers: Research and Management* 1(2):171-81.
- Osborne, L. L., M. J. Wiley, et R. W. Larimore. (1988). Assessment of the water surface profile model: accuracy of predicted instream fish habitat conditions in low-gradient, warmwater streams. *Regulated Rivers: Research and Management* 2(5):619-31.
- Petts, G.E. et Maddock, I. (1994). Flow allocation for in-river needs. Dans The River Handbook P. Calow and G.E. Petts Eds. Volume 2: 289-308.
- Secretan, Y., M. Leclerc, Y. Roy et collaborateurs multiples. (1996). Logiciel MODE-LEUR. Développé pour le compte du Fonds de recherche et de développement technologique en environnement (MEF) et HMS-Énergie inc

- Scott, D. et C. S. Shirvell. (1987). "Critique of the Instream Flow Incremental Methodology and Observations on Flow Determination in New Zealand." Pp. 27-43 in *Regulated Streams: Advances in Ecology*New York: Plenum Press.
- Shirvell, C. S. (1989). "Ability of PHABSIM to Predict Chinook Salmon Spawning Habitat." Regulated Rivers: Research and Management 3(1-4):277-89.
- Souchon, Y., F. Trocherie, E. Fragnoud, et C. Lacombe. (1989). "Les Modeles Numeriques Des Microhabitats Des Poissons: Application Et Nouveaux Developpements." *Revue* Des Sciences De L'Eau 2(4):807-30.
- Stalnaker, C.B. et J.L. Arnette. (1976). Methodologies for determining instream flows for fish and other aquatic life. *Dans Methodologies for the determination of stream ressource maintenance flow requirements : an assessment*. Prepared for U.S. Fish and Wildlife Service. Fort Collins, Colorado.
- Tarbet, K.L. et T.B. Hardy. (1996). Evaluation of one-dimensional and two-dimensional hydraulic modeling in a natural river and implication in instream flow assessment methods. Dans Comptes-rendus du deuxième Symposium international de l'AIRH sur l'hydraulique et les habitats-Écohydraulique 2000, M. Leclerc et al Eds. Volume B 395-406. Québec, Juin 1996.
- Thomas, J. A. et K. D. Bovee. (1993). Application and testing of a procedure to evaluate transferability of habitat suitability criteria. *Regulated Rivers: Research & Management* 8(3):285-294.
- Waddle, T., P. Steffler, A. Ghanem, C. Katopodis et A. locke. (1996). Comparison of one and two-dimensional hydrodynamic models for a small habitat stream. Présenté au deuxième Symposium international de l'AIRH sur l'hydraulique et les habitats-Écohydraulique 2000, Québec, Juin 1996
- Waters, B.F. (1976). A methodology for evaluating the effects of differents streamflows on salmonid habitat. *dans Instream Flow Needs J.F. Orsborn et C.H. Allmen Eds.* American Fisheries Society, Western Division, Bethesda, Maryland, 254-266.
- Wesche, T.A. et P.A. Rechard. (1980). A summary of instream flow methods for fisheries and related research needs. Bulletin 9. Eisenhower Consortium for Western Envir. Forestry Res.

## ANNEXE



Figure 25 :Carte des isosurfaces de profondeur aux 0,25 mètre pour un débit de 7 m<sup>3</sup>/s sur le tronçon à l'étude de la rivière Sainte-Marguerite



Figure 26 :Carte des isosurfaces de vitesse aux 0,10 m/s pour un débit de 7 m<sup>3</sup>/s sur le tronçon à l'étude de la rivière Sainte-Marguerite



Figure 27 : Carte des isosurfaces de profondeur aux 0,25 mètre pour un débit de 25 m<sup>3</sup>/s sur le tronçon à l'étude de la rivière Sainte-Marguerite



Figure 28 : Carte des isosurfaces de vitesse aux 0,25 m/s pour un débit de 25 m<sup>3</sup>/s sur le tronçon à l'étude de la rivière Sainte-Marguerite



Figure 29 : Carte des isosurfaces de profondeur aux 0,25 mètre pour un débit de 100 m<sup>3</sup>/s sur le tronçon à l'étude de la rivière Sainte-Marguerite



Figure 30 : Carte des isosurfaces de vitesse aux 0,25 m/s pour un débit de 100 m<sup>3</sup>/s sur le tronçon à l'étude de la rivière Sainte-Marguerite