

Université du Québec

INRS-Eau

**CONTRIBUTION À LA VALIDATION PHYSIQUE DE LA MODÉLISATION DES
MICROHABITATS EN 2D POUR LE SAUMON ATLANTIQUE (*SALMO SALAR*)
DE LA RIVIÈRE SAINTE-MARGUERITE**

Par

Daniel Rioux

Mémoire présenté

pour l'obtention

du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)

Jury d'évaluation

Examineur interne

Yves Secretan, INRS-Eau

Examineur externe

Daniel Boisclair

Biologie

Université de Montréal

Directeur de recherche

Michel Leclerc, INRS-Eau

Pour fins de citation :

D. Rioux. 2000. Contribution à la validation physique de la modélisation des microhabitats en 2D pour le saumon Atlantique (*Salmo salar*) de la rivière Sainte-Marguerite. *Mémoire de maîtrise*, INRS-Eau. Sainte-Foy, Québec. 164 p.

Résumé

La modélisation des microhabitats permet d'obtenir des indices de qualité d'habitat pour une espèce de poisson. Le microhabitat est une fonction de plusieurs variables biotiques et abiotiques. Toutefois, les variables abiotiques de profondeur, de vitesse de courant et celle de substrat sont généralement suffisantes pour obtenir une description représentative du choix d'habitat effectué par le poisson.

Dans le cas présent, le tacon (juvénile) du saumon Atlantique (*Salmo salar*) a été choisi car il est très territorial et tend à se choisir un site avec une roche lui fournissant un abri contre le courant tout en lui permettant de voir ses proies venir par la dérive. Son microhabitat est donc facilement descriptible et se prête bien au type de modélisation que l'on désire effectuer.

La méthode traditionnelle pour décrire l'habitat consiste à récolter des données de profondeur, de vitesse et de substrat aux endroits où un jeune saumon est observé (préférences d'habitat). Par la suite, on procède à une récolte aléatoire de données sur l'ensemble du tronçon afin de connaître la disponibilité des conditions présentes.

La méthode tentée ici, consiste à utiliser un outil de modélisation hydrodynamique afin de recréer les conditions hydrauliques (profondeurs et vitesses d'écoulement) présentes sur la rivière et d'obtenir ainsi, la disponibilité des conditions de façon mathématique à partir des débits réels s'écoulant dans la rivière. Il s'agit donc de substituer la distribution de fréquence des conditions abiotiques obtenue par mesure directe sur le terrain (disponibilité de conditions) par celle que le modèle numérique fournira. Les données nécessaires à la calibration du modèle numérique qui ont été utilisées sont les données mesurées sur le terrain qui ont été utilisées pour calculer les fréquences d'utilisation du territoire par le poisson. Il a donc fallu s'assurer de l'homogénéité des ensembles de données mesurées par rapport aux données hydrodynamiques que livre le modèle.

Pour un débit d'étiage de $2,6 \text{ m}^3/\text{s}$, des erreurs moyennes de 19% ont été observées entre les deux ensembles de données pour les profondeurs alors que des erreurs moyennes de 35% sont apparues pour les vitesses supérieures à 0,10 m/s. Divers tests ont donc été entrepris

afin de vérifier si certaines méthodes ne permettraient pas d'améliorer les résultats en ce qui a trait à l'écart entre les valeurs simulées et celles mesurées sur la rivière en étiage extrême. Les essais ont été faits en variant la paramétrisation du frottement et aussi, la discrétisation du maillage hydrodynamique. Une vérification des méthodes de prise de mesures sur le terrain a aussi été effectuée.

Ceci permettra donc de faire certaines recommandations pour les utilisateurs futurs de logiciel de simulation hydrodynamique afin que ceux-ci récoltent des données valables sur le terrain, particulièrement dans les cas de rivière à pente forte (gros alluvions) simulées à de faibles débits.

Remerciements

Je tiens d'abord à remercier M. Michel Leclerc, mon directeur de maîtrise, pour l'aide continuelle qu'il m'a fourni tout au long de ce long travail. Son imagination et ses nouvelles idées m'ont souvent été d'un grand secours. Il a su me transmettre une vision globale de l'interaction entre les processus physiques et biologiques du monde que constitue une rivière ou un fleuve et je lui en serai éternellement reconnaissant. J'aimerais remercier aussi M. Yves Secretan et M. Paul Boudreau pour leurs conseils judicieux en ce qui concerne les simulations hydrodynamiques. Un merci spécial à M. Mourad Heniche qui m'a appris comment on construit un modèle numérique de terrain ainsi que les étapes à franchir pour réaliser une simulation hydrodynamique. Sans lui, je serais probablement encore assis devant mon ordinateur afin de tenter de réaliser une simulation convenable. Merci à M. Daniel Boisclair et M. Michel Lapointe pour leurs conseils très appréciés lors de ma campagne de terrain ainsi qu'à toute l'organisation du CIRSA et ses partenaires, pour m'avoir fourni les moyens de réaliser ce travail.

J'aimerais aussi remercier ma famille, mon père, Raymond, et ma mère, Nicole, pour m'avoir inculqué le goût des sciences ainsi que la curiosité nécessaire à ce que je sois constamment poussé à me poser de nouvelles questions qui me permettent d'avancer dans tout ce que je fais. Merci aussi à mon frère Steve pour son soutien tout au long de mes nombreuses années d'études. Sans l'encouragement de ma famille, je ne serais pas en train de taper ces quelques lignes.

En terminant, je tiens à remercier ceux avec qui j'ai étudié au cours des dernières années. Ils sont devenus de vrais amis et confidents. J'ai passé de très bons moments en leur compagnie et j'espère qu'il y en aura encore beaucoup d'autres.

Table des matières

Résumé.....	iii
Remerciements.....	v
Liste des figures.....	xi
Liste des tableaux.....	xiii
1. Introduction.....	1
1.1 Problématique.....	1
1.2 Objectif général.....	2
1.3 Stratégie utilisée.....	2
2. La modélisation des micro-habitats.....	5
2.1 Introduction.....	5
2.2 Écologie du saumon atlantique.....	10
2.2.1 Cycle de vie.....	11
2.2.2 Le frai.....	11
2.2.3 Développement des œufs et stade larvaire.....	12
2.2.4 Développement du juvénile et choix d'habitat.....	12
2.2.5 Passage du stade tacon au stade saumoneau.....	14
2.2.6 Alimentation des juvéniles.....	16
2.2.7 Sources de mortalité.....	16
2.2.7.1 La température.....	17
2.2.7.2 L'oxygène dissous.....	17
2.2.7.3 Le pH.....	18
2.2.7.4 Parasitisme et maladie.....	18
2.2.7.5 Prédation.....	18
2.3 Les modèles.....	19
2.3.1 Le modèle hydrodynamique bidimensionnel (HYDROSIM).....	19
2.3.1.1 Les éléments finis et l'élément T-6-3 d'HYDROSIM.....	20
2.3.1.2 Équations de conservation.....	22
2.3.1.3 Les conditions initiales et aux limites.....	26
2.3.1.4 Calibration et validation du modèle hydrodynamique.....	26
2.3.2 Le modèle biologique.....	27
2.3.2.1 Le microhabitat.....	27
2.3.2.2 L'habitat préférentiel.....	28

2.3.2.3	La vitesse du courant comme facteur d'habitat.....	29
2.3.2.4	Disponibilité -vs- utilisation de l'habitat : l'indice de base.....	30
2.3.2.5	Indice global d'habitat	31
2.3.2.6	Calcul des aires d'habitat sur un site.....	32
2.4	Résumé de la méthode.....	34
3.	Campagne de terrain	37
3.1	Démarche	37
3.2	Caractérisation du terrain	41
3.2.1	La rivière Sainte-Marguerite et le CIRSA	41
3.2.2	Choix du tronçon à l'étude	42
3.2.3	Période de caractérisation.....	45
3.2.4	Établissement d'un système de repérage local.....	45
3.2.5	Topographie du tronçon	45
3.2.5.1	Matériel et méthode	45
3.2.5.2	Plan de caractérisation	46
3.2.5.3	Carte du tronçon	47
3.2.6	Hydrologie du tronçon.....	51
3.2.6.1	Méthodologie de prise des niveaux d'eau.....	51
3.2.6.2	Méthodologie de prise de débit.....	51
3.2.6.3	Méthodologie de prise des vitesses.....	55
3.2.7	Caractérisation du substrat.....	56
3.2.7.1	Méthodologie.....	56
3.2.7.2	Plan de caractérisation	57
3.2.8	Distribution du tacon dans la rivière.....	59
3.2.8.1	Mesures des vitesses pour déterminer les fréquences d'habitat	61
4.	Modèle de terrain et Simulations hydrodynamiques	63
4.1	Création du modèle numérique de terrain	63
4.2	Conditions aux limites, calibration et validation	66
4.3	Analyse préliminaire des premiers résultats de calibration	70
4.3.1	Simulations de base à 2,6 m ³ /s.....	70
4.4	Tentative de diminution des écarts entre les valeurs simulées et mesurées pour les vitesses	75
4.4.1	Ajustement du modèle par la discrétisation	75
4.4.2	Résultats des simulations avec changement de discrétisation.....	76
4.4.2.1	Maillage alternatif sur le domaine entier.....	76
4.4.2.2	Maillage alternatif du sous-domaine amont	76

4.4.2.3	Discussion.....	77
4.4.3	Alternative à la paramétrisation du frottement	80
4.4.4	Résultats des simulations effectuées avec une nouvelle paramétrisation du frottement	88
4.5	Discussion sur les écarts	88
4.5.1	Écarts sur les profondeurs	89
4.5.2	Écarts sur les vitesses	91
4.5.3	Analyse statistique des données mesurées et simulées	93
5.	Simulation d'habitat.....	101
5.1	Construction et paramétrisation	101
5.2	Application du modèle : calcul des aires pondérées utiles (<i>APU</i>)	102
5.3	Courbes de préférence et valeurs d' <i>APUs</i>	103
6.	Conclusion.....	111
6.1	Recommandations sur les techniques à utiliser pour caractériser et modéliser les petits cours d'eau alluvionnaires	111
6.1.1	Sur la topographie	112
6.1.2	Sur les niveaux d'eau.....	113
6.1.3	Sur les vitesses de courant.....	114
6.2	Conclusion	116
7.	Bibliographie	121
	Annexes.....	127

Liste des figures

1. Figure 2.1 : Courbes des indices de préférence d'habitat par le jeune saumon atlantique (<i>Salmo salar</i>) dans un cours d'eau norvégien en été. (a) profondeur d'eau. (b) vitesse moyenne du courant. (c) Substrat. (Courbes tirées de Heggenes, 1996)	15
2. Figure 2.2 : Représentation d'un élément fini de type T-6-3 et des sous-éléments T-3 avec la disposition des variables nodales	21
3. Figure 2.3 : Représentation d'un élément de type T-3 après subdivision à partir d'un élément T-6	34
4. Figure 2.4 : Diagramme représentant la méthode classique de modélisation des habitats.	35
5. Figure 3.1 : Diagramme représentant la nouvelle méthode de modélisation des habitats qui se sert du modèle numérique de terrain pour déterminer les indices d'habitat.	39
6. Figure 3.2 : Diagrammes représentant une version simplifiée de la méthode classique et proposée s'inscrivant dans la méthodologie plus vaste présentée dans les figures 2.4 et 3.1	40
7. Figure 3.3 : Représentation de la rivière Sainte-Marguerite avec ses trois branches : Principale, Nord-Est et Nord-Ouest.	42
8. Figure 3.4 : Tronçon choisi pour l'étude	44
9. Figure 3.5 : Localisation des points du polygone de nivellement.	48
10. Figure 3.6 : Localisation des points de données topographiques recueillis sur la rivière Sainte-Marguerite à l'aide de la station totale	49
11. Figure 3.7 : Topographie du tronçon à l'étude	50
12. Figure 3.8 : Représentation de la méthode utilisée pour établir les débits s'écoulant dans la rivière.	52
13. Figure 3.9 : Courbe de tarage de la station limnimétrique implantée sur l'amont du tronçon à l'étude (l'équation représente un ajustement polynomial (courbe) sur les valeurs mesurées).	54
14. Figure 3.10 : Diamètre médian (d_{50}) du substrat sur l'ensemble du tronçon de rivière.	58
15. Figure 3.11 : Délimitation des trois sections de rivière pour la cueillette des données de calibration et de validation	60
16. Figure 4.1 : Maillage hydrodynamique constitué de 11186 noeuds servant à créer le MNT.	65
17. Figure 4.2 : Localisation des points où les poissons ont été observés aux débits de 2,6, 3,3 et 5,6 m ³ /s et où des données physiques ont été récoltées.	69
18. Figure 4.3 : Profondeurs simulées à l'aide d'HYDROSIM en fonction des profondeurs mesurées en certains points de la rivière pour un débit de 2,6 m ³ /s	72
19. Figure 4.4 : Vitesses simulées à l'aide d'HYDROSIM en fonction des vitesses mesurées en certains points de la rivière pour un débit de 2,6 m ³ /s	72
20. Figure 4.5 : Profondeurs simulées à l'aide d'HYDROSIM en fonction des profondeurs mesurées en	

certains points de la rivière pour un débit de $3,3 \text{ m}^3/\text{s}$	73
21. Figure 4.6 : Vitesses simulées à l'aide d'HYDROSIM en fonction des vitesses mesurées en certains points de la rivière pour un débit de $3,3 \text{ m}^3/\text{s}$	73
22. Figure 4.7 : Profondeurs simulées à l'aide d'HYDROSIM en fonction des profondeurs mesurées en certains points de la rivière pour un débit de $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$	74
23. Figure 4.8 : Vitesses simulées à l'aide d'HYDROSIM en fonction des vitesses mesurées en certains points de la rivière pour un débit de $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$	74
24. Figure 4.9 : Maillage hydrodynamique pour tout le tronçon de rivière, contenant 54389 noeuds.	78
25. Figure 4.10 : Maillage hydrodynamique pour le début du tronçon contenant 40013 noeuds.	79
26. Figure 4.11 : Graphe représentant les écarts entre les vitesses mesurées et les vitesses simulées en fonction des vitesses mesurées en certains points de la rivière pour un débit de $2,6 \text{ m}^3/\text{s}$	80
27. Figure 4.12 : Graphe représentant les écarts entre des valeurs aléatoires (5) situées entre 0 et 20 assignées à des valeurs de 0 à 20.	81
28. Figure 4.13 : Coefficients de Manning calculés en fonction de la profondeur simulée en ces points.	85
29. Figure 4.14 : Représentation de l'interpolation effectuée par MODELEUR entre les points de topographie 1 et 4 (ligne pointillé). Si une profondeur est mesurée au point 3 (profondeur de $D1 + D2$), la profondeur à cet endroit sur le MNT (point 2) sera seulement de $D1$ d'où une différence de $D2$ entre les deux topographies (la topographie réelle et celle reportée sur le MNT).	90
30. Figure 4.15 : Représentation d'un profil de courant en forme de S dû à l'importance de la dimension du substrat comparativement à la profondeur (rapport H/d_{50} faible).	97
31. Figure 4.16 : Erreur relative sur les vitesses en fonction de la profondeur mesurée selon les résultats obtenus avec la simulation effectuée au débit de $2,6 \text{ m}^3/\text{s}$ à l'aide du maillage de la figure 4.9.	98
32. Figure 5.1 : Indices de préférence de profondeur pour les tacons de saumon atlantique d'âge 1+ et 2+.	103
33. Figure 5.2 : Indices de préférence de vitesse pour les tacons de saumon atlantique d'âge 1+ et 2+.	104
34. Figure 5.3 : Indices de préférence de d_{50} de substrat pour les tacons de saumon atlantique d'âge 1+ et 2+.	104
35. Figure 5.4: Isosurfaces des indices d'habitat générées à l'aide du logiciel MODELEUR pour un débit de $2,6 \text{ m}^3/\text{s}$	106
36. Figure 5.5: Isosurfaces des indices d'habitat générées à l'aide du logiciel MODELEUR pour un débit de $3,3 \text{ m}^3/\text{s}$	107
37. Figure 5.6: Isosurfaces des indices d'habitat générées à l'aide du logiciel MODELEUR pour un débit de $9,2 \text{ m}^3/\text{s}$	108

Liste des tableaux

38. Tableau 3.1 : Mesures prises pour établir la courbe de tarage débit - niveau de la rivière Sainte-Marguerite.	53
39. Tableau 3.2 : Données hydrologiques du tronçon étudié sur la période correspondant à la prise de données abiotiques sur le poisson, s'étendant du 17 juillet au 22 août 1997.....	54
40. Tableau 3.3 : Classes de substrat utilisées pour la cartographie du tronçon.....	57
41. Tableau 4.1 : Débits simulés pour calibrer et valider les simulations hydrodynamiques.	68
42. Tableau 4.2 : Valeur des paramètres optimisés de l'équation 3.6 permettant de calculer les coefficients de Manning.	87
43. Tableau 4.3: Données statistiques pour les vitesses mesurées et simulées aux endroits où des poissons ont été localisés ainsi que pour les domaines (sections de tronçon) où les observations ont été faites pour les trois débits simulés à l'aide d'HYDROSIM (Sim.= Vitesses simulées localisées, Mes.=Vitesse mesurées localisées et Dom.=Champ de vitesses simulées sur le domaine).....	94
44. Tableau 5.1 : Aires pondérées utiles (avec $0,7 < I_g < 1,0$) calculées pour différents débits simulés.	109
45. Tableau 6.1 : Recommandations permettant d'améliorer la qualité des données récoltées sur le terrain afin de les rendre homogènes avec les données simulées.	116

1. INTRODUCTION

1.1 Problématique

L'histoire entourant l'évolution des méthodes de modélisation des habitats de poissons a débuté dans les années 1950-60. Depuis plusieurs années, on notait la diminution des stocks de poissons dans les rivières ainsi que de la faune environnante suite au développement de barrages et de réservoirs. Avant 1960, les spécialistes qui travaillaient dans ces domaines n'utilisaient que leur simple jugement afin d'évaluer la quantité et la qualité des habitats nécessaires au maintien des stocks (Nestler *et al.*, 1989). Les besoins grandissants de gestion et la réglementation à ce niveau ont nécessité que des biologistes et des hydrauliciens développent conjointement des outils applicables à ces fins (Stalnaker, 1994). Les outils développés devaient prédire les conditions hydrauliques dans les cours d'eau engendrées par les divers débits possibles, ainsi que par la modification du régime d'écoulement de ceux-ci par les ouvrages de génie civil.

Le problème est que la connaissance des conditions hydrauliques dans le cours d'eau n'était pas suffisante. Il fallait en plus pouvoir associer celles-ci aux besoins du poisson. Les préférences d'habitat du poisson devaient alors être connues et juxtaposées à ces connaissances afin de déterminer les débits réservés, c'est-à-dire, les conditions minimales d'écoulement requises pour assurer la présence d'habitats de qualité suffisante et en quantité assez importante pour permettre la survie du poisson. C'est ainsi qu'ont été établies les méthodes de gestion et de régularisation des rivières à des fins piscicoles. La plus connue est la méthode IFIM (Instream Flow Incremental Methodology) développée par Bovee et Milhous (1978) dont la composante principale, PHABSIM (Physical HABitat SIMulation) (Bovee, 1986 ; Lafleur, 1997) sert à évaluer à l'aide de la simulation, les conditions d'habitat du milieu à l'étude. PHABSIM est un simulateur hydrodynamique

unidimensionnel couplé à un modèle biologique (préférence d'habitat) servant à déterminer la qualité et la quantité des habitats disponibles. Dans un effort pour toujours faire évoluer les techniques utilisées dans ce domaine, l'INRS-Eau (Leclerc *et al.*, 1995) a développé un outil similaire appelé HABIOSIM qui utilise un logiciel appelé MODELEUR-HYDROSIM dont le simulateur hydrodynamique est bidimensionnel. Celui-ci permet d'obtenir des résultats abiotiques qui se rapprochent nettement plus des conditions réelles d'écoulement dans les cours d'eau (Lafleur, 1997).

1.2 Objectif général

L'objectif général de ce projet est la réalisation d'un modèle hydrodynamique d'un tronçon de la rivière Sainte-Marguerite dans des conditions d'étiage sévère ainsi que la création de courbes de préférences des tacons de saumon atlantique en utilisant une variante de la méthode classique de modélisation des habitats de poissons. Plus spécifiquement, il s'agit de substituer la distribution de fréquence des conditions abiotiques obtenue par mesure directe sur le terrain (disponibilité de conditions) par celle que le modèle numérique de terrain fournira. Ceci nécessite que le modèle soit bien calibré et validé. Pour ce faire, on devra d'abord s'assurer de l'homogénéité des ensembles de données soit, les fréquences d'utilisation des variables abiotiques mesurées directement sur le terrain, et les données de fréquences des conditions abiotiques (disponibilité) obtenues par le modèle numérique.

1.3 Stratégie utilisée

La différence entre la méthode classique et la méthode tentée ici, est l'utilisation des modèles de terrain et hydrodynamique pour la détermination des indices de préférences d'habitat. Habituellement, les courbes de préférences sont établies en effectuant une cueillette de données aux points où les tacons sont observés, ainsi qu'une cueillette de

données aléatoires sur le tronçon. La première collecte sert à connaître les préférences d'habitat tandis que la seconde sert à représenter l'ensemble des vitesses, des profondeurs et du substrat présent sur le terrain pour savoir ce qui était disponible pour le poisson. On peut alors déterminer des fréquences d'utilisation des habitats selon leur disponibilité.

Toutefois, dans le présent projet, les données de disponibilité des habitats proviendront des simulations hydrodynamiques qui auront été préalablement calibrées et validées pour divers débits afin de s'assurer qu'elles recréent bien les conditions présentes sur le terrain. Les données qui serviront à la calibration seront les données de fréquences d'utilisation du territoire par le poisson ce qui explique que l'on doit s'assurer de l'homogénéité de cet ensemble de données par rapport à ce que livre le modèle. De plus, divers tests seront entrepris afin de vérifier si certaines méthodes peuvent permettre d'améliorer les résultats en ce qui a trait, le cas échéant, aux écarts entre les variables calculées et mesurées étant donné les conditions extrêmes que l'on retrouve dans une rivière en étiage et les difficultés de simulation que cela représente. Les essais affecteront la paramétrisation du frottement et aussi de la discrétisation du maillage hydrodynamique et aussi une vérification des méthodes de prise de mesures sur le terrain. Certaines recommandations seront données aux futurs utilisateurs des programmes de simulation hydrodynamique afin que ceux-ci soient prudents dans leurs interprétations des résultats lorsqu'une rivière à pente forte (grosses alluvions) est simulée avec de faibles débits.

Pour réaliser ce projet, la caractérisation d'un tronçon de la rivière Sainte-Marguerite a d'abord été effectuée en mettant à contribution trois équipes de recherche travaillant en collaboration dans le cadre du Centre Inter-universitaire de Recherche sur le Saumon Atlantique (CIRSA) soit, celle des professeurs Michel Leclerc (INRS-Eau), Daniel Boisclair (Université de Montréal) et Michel Lapointe (Université McGill). Ces trois équipes ont recueilli plusieurs données sur le terrain. La topographie de la section choisie a été caractérisée afin qu'une carte de la rivière puisse être utilisée pour la simulation hydrodynamique. Les diverses classes d'alluvions présentes ont aussi été localisées et

enregistrées. Ensuite, le tronçon a été parcouru dans son entier à quelques reprises en apnée afin de répertorier l'emplacement des tacons de saumon atlantique. Certaines données abiotiques comprenant, la vitesse moyenne, la profondeur et le substrat, ont été enregistrées afin de caractériser le microhabitat du poisson (conditions morphodynamiques à l'échelle du territoire du poisson) et aussi de calibrer le modèle hydrodynamique. L'équipe de l'INRS-Eau, dont le présent mémoire constitue le compte-rendu des recherches effectuées, s'est concentrée sur les simulations hydrodynamiques de la rivière alors que l'équipe de l'Université de Montréal a procédé à la construction des indices de préférences d'habitat. Les collaborateurs de l'Université McGill ont contribué à établir le protocole d'observation des substrats.

2. LA MODÉLISATION DES MICRO-HABITATS

2.1 Introduction

Suite aux besoins grandissant de méthodes de gestion des ressources en eau, diverses techniques permettant de quantifier la qualité écologique d'un cours d'eau en fonction de son débit, furent développées. La plus connue est la méthode IFIM (Instream Flow Incremental Methodology) (Bovee et Milhous, 1978). Celle-ci fut proposée par la U.S. Fish and Wildlife Cooperative Instream Flow Service Group formé en 1976 afin de servir de point central concernant la gestion des débits. IFIM est avant tout un concept, une méthodologie servant à la résolution de problème. C'est un ensemble de modèles informatiques et de procédures analytiques qui furent développés au cours des 20 dernières années grâce à l'expertise d'agences de protection environnementale, d'ingénieurs, d'experts en lois sur l'eau, en écologie aquatique, ainsi qu'en biologie du poisson. IFIM propose donc un cadre organisationnel de travail afin d'évaluer divers scénarios de gestion. Ces scénarios entrent en jeu lorsque survient un développement structural sur un cours d'eau (création de barrage, redistribution d'un écoulement de façon saisonnière ou annuelle, restauration de berge, etc.) et que l'on doit gérer celui-ci. IFIM peut donc être utilisé pour prédire les effets de ces développements sur les habitats aquatiques fluviaux. C'est ce que l'on appelle la modélisation des microhabitats de poisson.

L'élément central de la méthode IFIM est PHABSIM, un ensemble de petits programmes (Bovee, 1986) permettant de calculer l'aire totale des habitats utiles disponibles ainsi que leur qualité, en fonction du débit. On y retrouve deux éléments majeurs : un modèle biologique et un modèle hydrodynamique. Le modèle biologique se traduit par des préférences d'habitat. L'occupation d'une certaine zone de la rivière par le poisson dépend entre autres choses de l'espèce étudiée et de sa grosseur (Heggenes, 1996). Par exemple, le

saumon atlantique (*Salmo salar*) choisira des eaux plus rapides et souvent des zones moins profondes que la truite brune (*Salmo trutta*). Plusieurs variables peuvent être utilisées afin de décrire l'habitat du saumon comme la vitesse du courant, la profondeur d'eau, le substrat, le degré d'ensablement, le couvert ainsi que la dérive. Waters (1976) a cependant déterminé que l'habitat du poisson peut être assez bien décrit par certaines, seulement, de ces variables physiques soit la profondeur, la vitesse d'écoulement de l'eau et le substrat. Comme on le sait maintenant, le poisson préfère certaines gammes de valeurs de ces variables. Celles-ci serviront alors à créer un modèle de préférence d'habitat du poisson qui sera ensuite couplé au modèle hydrodynamique afin de pouvoir quantifier la disponibilité des habitats et leur qualité en fonction du débit.

De son côté, le modèle hydrodynamique consiste en une reproduction la plus fidèle possible des diverses conditions locales retrouvées dans le système fluvial à l'étude en fonction du débit. Il est constitué d'équations hydrodynamiques décrivant les lois d'écoulement, appliquées au tronçon fluvial étudié. Dans le cas de PHABSIM, le modèle hydrodynamique est unidimensionnel (1D). Celui-ci calcule le profil de la surface libre pour les écoulements permanents graduellement variés et simule les vitesses à différents débits. On dit que le modèle est unidimensionnel car il calcule un niveau d'eau qui est attribué sur toute la largeur de la rivière. On considère donc seulement un profil longitudinal de la ligne d'eau. Quant aux vitesses simulées, le modèle calcule une vitesse moyenne sur une section de rivière et la redistribue transversalement donnant ici un résultat pseudo-bidimensionnel. L'orientation de cette vitesse sera cependant toujours perpendiculaire à la section transversale de la rivière ce qui entraîne une perte de représentativité au niveau des mouvements transversaux et des incertitudes parfois flagrantes (Ghanem, 1994). PHABSIM est encore aujourd'hui le système le plus utilisé pour modéliser les habitats du poisson. Cependant, plusieurs études mettent en doute certains aspects de cette méthode.

Gan et McMahon (1990) font mention de la possibilité d'obtenir des résultats très variables à l'aide de PHABSIM. En effet, il est possible voire, nécessaire d'utiliser un ensemble de

petits programmes de calculs, ceux-ci ayant diverses fonctions complémentaires. Ainsi, quatre programmes différents sont utilisés pour simuler les vitesses et les profondeurs. Ceux-ci sont : IFG4, WSP, MANSQ et STGQS4. Selon le logiciel que l'utilisateur décide d'utiliser, et dépendant de son degré de maîtrise de la méthodologie de modélisation proposée, il est possible d'obtenir des résultats différents à partir d'un même ensemble de données. De plus, cette méthodologie étant quelque peu complexe et difficile à mettre en oeuvre (Lafleur, 1997 ; Lafleur et Leclerc, 1997), les risques d'incertitude s'en trouvent accrus.

Selon Orth et Maughan (1982), cinq conditions doivent être assumées afin que la méthode de modélisation des habitats puisse être utilisée : (1) la profondeur, la vitesse et le substrat sont les variables qui affectent le plus la distribution et l'abondance du poisson dans un cours d'eau ; (2) la morphologie du cours d'eau n'est pas affectée par les changements de débit ; (3) la profondeur, le substrat et la vitesse sont indépendants dans leur façon d'influencer le choix d'habitat du poisson ; (4) le cours d'eau peut être modélisé en utilisant comme référence, un tronçon représentatif de celui-ci ; (5) il y a un lien direct et positif entre les aires pondérées utiles et l'utilisation de l'habitat qui sert de base à la validation des modèles d'habitat (causalité).

Selon certains auteurs, ces éléments ne seraient pas toujours respectés. Par exemple, la présence d'un réservoir peut influencer la composition chimique de l'eau à l'aval de celui-ci, entraînant une transgression à la première supposition si l'on tient compte du fait que les agents chimiques présents dans l'eau peuvent modifier le choix d'habitat du poisson. La température et l'oxygène dissous peuvent aussi jouer un rôle déterminant dans certains cours d'eau. En effet, durant l'été en période d'étiage (faible débit donc niveau d'eau bas), il est très possible que la concentration d'oxygène dissous soit plus basse et que les températures soient plus élevées. Orth et Maughan (1982) démontrent aussi que parfois, il existe une forte dépendance entre deux des variables mentionnées ou plus. En effet, on observe une interaction certaine entre la profondeur et la vitesse, interaction d'ailleurs

représentée dans les équations hydrodynamiques. Le phénomène est apparent lorsque par exemple des vitesses plus élevées entraînent un décalage de la gamme des profondeurs optimales vers des profondeurs plus grandes. À ce moment, en assumant l'indépendance de la profondeur et de la vitesse, les estimations des aires pondérées utiles sont plus faibles dans les gammes élevées de débit. Dans le cas de la quatrième condition (tronçon représentatif), il est très possible que le tronçon étudié ne soit pas une représentation exacte des conditions que l'on peut retrouver dans tout le cours d'eau. Entre autres, l'absence de certaines caractéristiques physiques dans le tronçon comme une fosse, peut entraîner un biais lorsque les courbes de préférences sont appliquées au cours d'eau. De plus, on ne dispose pas de véritable moyen de vérifier la représentativité du tronçon. On se replie alors sur le fait que le tronçon doit comporter une quantité appréciable de bons habitats.

Quant à la cinquième supposition (causalité), la validité de celle-ci dépend de la validité de l'indépendance des variables mentionnées plus haut et du fait qu'elles soient les trois plus critiques. Pour une faible valeur d'aire pondérée utile (*APU*), il est clair que l'habitat utilisable sera limitant étant donné que cette valeur d'*APU* est probablement due à un faible ou un fort débit ou certaines conditions particulières d'habitat. Cependant, pour un *APU* plus élevé, d'autres facteurs peuvent entrer en ligne de compte. Orth et Maughan (1982) montrent certaines corrélations entre l'*APU* et la biomasse de poisson observée pour trois espèces de poisson. Cependant, il n'y a pas encore eu assez d'études pour pouvoir faire une généralisation valide de la dernière supposition. On peut retrouver une liste des éléments criticables de la modélisation des habitats de poisson dans Souchon *et al.* (1989).

Malgré ces critiques, la méthode de modélisation des habitats de poisson a tout de même réussi à fournir de bons résultats au cours des années selon le contexte d'utilisation et les outils sélectionnés. Les modèles numériques proposés dans PHABSIM semblent en fait être trop simplifiés. Ceux-ci ne permettent pas entre autres choses, d'obtenir des extrapolations fiables, loin à l'extérieur de l'intervalle des débits mesurés (Leclerc *et al.* 1995). Ces modèles introduisent de plus une erreur appréciable sur des aires inférieures à 10 m² ce qui

est un problème puisque l'on ne peut obtenir une bonne description de l'habitat à l'échelle territoire du poisson.

Le besoin en modèles disposant d'un meilleur pouvoir prédictif devenant nécessaire, certains chercheurs ont proposé l'utilisation d'outils plus complets. Une des avenues en exploration est l'utilisation de modèles à deux dimensions (2D). Leclerc *et al.* (1994) ont proposé une technique de modélisation bidimensionnelle à bancs couvrants-découvrants basée sur l'approche des éléments finis, laquelle permet de surmonter la plupart des limitations des méthodes classiques à une dimension (modèles de régression, courbes de remous). Des études ont été entreprises afin de déterminer si l'utilisation d'un modèle à deux dimensions est justifiée et permet effectivement une amélioration des simulations et des résultats prédictifs. Selon Tarbet et Hardy (1996) et Lafleur (1997), les prédictions au niveau des *APUs* sont relativement similaires entre les deux types de simulation et dépendent beaucoup du nombre de transects utilisé pour la simulation à une dimension. Plus la caractérisation est bonne, plus les résultats se rapprochent de la simulation 2D. L'étude de Tarbet et Hardy fut réalisée à l'aide d'un modèle de simulation 2D appelé RMA-2. L'efficacité d'utilisation du modèle 2D n'était cependant pas prise en considération dans cette étude. Le modèle bidimensionnel de Leclerc (Heniche *et al.*, 1999), HYDROSIM, a cependant été comparé aux modèles 1D de PHABSIM par Lafleur (1997). L'étude fut effectuée à plusieurs niveaux de comparaison dont, l'effort de terrain nécessaire, la facilité d'utilisation et de calibration des modèles, la versatilité d'utilisation des modèles et la précision des résultats. Selon Lafleur, le modèle 2D présente plusieurs avantages sur PHABSIM. D'abord, l'effort de terrain est de loin inférieur à celui que nécessite une caractérisation adéquate avec PHABSIM du moins à l'égard des vitesses et du nombre de débits. Ensuite, HYDROSIM offre une structure plus simple puisqu'il n'y a pas de choix de programme à faire. La calibration y est beaucoup plus simple que dans PHABSIM où elle est considérée comme étant longue et difficile. Quant à la versatilité des deux modèles, celle d'HYDROSIM est nettement supérieure car elle n'impose pas de contraintes selon les champs d'applications de la méthode même dans certaines situations très complexes

comme dans les cas de courants secondaires dominants. Le modèle hydrodynamique 2D permet de modéliser une plus grande gamme de situations réalistes (Lafleur, 1997) y compris des aménagements fauniques. En ce qui concerne la précision des résultats et leur exactitude, des écarts d'*APU* ont été observés mais ceux-ci ne sont pas significatifs dans un contexte de prise de décision de débit réservé. À cause de la méthode des éléments finis, le modèle 2D offre cependant un raffinement spatial plus intéressant utile pour cartographier les habitats. Le modèle biologique devient alors l'élément déterminant pour obtenir de bons résultats. HYDROSIM est le modèle hydrodynamique qui sera utilisé dans la présente recherche et son fonctionnement sera expliqué plus loin.

2.2 Écologie du saumon atlantique

La modélisation des habitats de poisson peut être appliquée à plusieurs espèces de poisson comme la truite brune (*Salmo trutta*), la truite arc-en-ciel (*Salmo gairdneri*), l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*) ou le saumon atlantique (*Salmo salar*). C'est cependant sur cette dernière espèce que porte la présente recherche. Le saumon atlantique est une espèce très importante économiquement au Québec et elle offre plusieurs caractéristiques qui se prêtent bien à une étude des habitats en cela que le saumon est territorial et il choisit donc un habitat qui lui est salubre et où il a tendance à demeurer. Il défend celui-ci farouchement contre les autres poissons qui veulent s'en emparer. La présente section est une revue du cycle de vie du saumon atlantique qui permet de mieux en saisir les motivations et agissements.

2.2.1 Cycle de vie

Le saumon atlantique est un poisson de type anadrome, c'est-à-dire qu'il vit en eau salée mais il se reproduit en eau douce. Les adultes reviennent frayer en eau douce car le saumon a besoin de ce type de milieu pour son développement à ses premiers stades de vie. Pour des raisons difficiles à expliquer, le saumon retourne à son lieu de naissance (« homing ») sans doute afin de maximiser les chances de survie de sa progéniture. La diversité génétique retrouvée dans une population provient du fait que leur cycle de vie peut être différent d'un individu à l'autre au sein d'une même population de rivière. La smoltification peut se produire à un âge différent d'un saumon à un autre et la durée de vie en mer avant la fraie peut aussi être différente selon les individus. Les conditions environnementales introduisent aussi un facteur de diversification en cela que la température, la prédation, le régime hydrologique et la disponibilité en nourriture peuvent varier d'un cours d'eau à un autre (Bley, 1987). Les prochaines sections présentent les divers stades de vie du saumon atlantique.

2.2.2 Le frai

La reproduction a lieu en eau douce comme mentionné auparavant. Le frai a lieu en octobre et novembre et se produit généralement à des températures inférieures à 7°C (Bley, 1987). La femelle construit un nid en creusant de petit trous de 25 à 50 cm de profondeur dans le lit de la rivière où elle y déposera ses œufs. En tout, elle peut porter de 2000 à 10000 œufs (Bley, 1987). L'endroit optimal pour localiser le nid est à la fin d'une fosse où le courant s'accélère et où le fond est de type graveleux. Le mâle fertilise les œufs dès que la femelle les a déposés dans le nid. Certains tacons atteignent la maturité sexuelle de façon précoce et participent aussi à la fertilisation des œufs. Après le frai, plusieurs mâles meurent (Bernatchez et Giroux, 1991). La femelle recouvre ensuite les œufs d'environ 10 à 25 cm de

gravier et poursuit ensuite sa ponte dans les autres nids (Bley, 1987). La ponte peut ainsi durer de 5 à 12 jours.

2.2.3 Développement des œufs et stade larvaire

Le développement des œufs s'effectue jusqu'au printemps suivant aux environs du mois d'avril. L'incubation dure généralement à peu près 110 jours mais elle dépend des conditions hivernales et surtout de la température de l'eau. Après l'éclosion, les alevins (0+) demeurent enfouis dans le gravier et se nourrissent à même leur sac vitellin pendant environ 6 semaines. Par la suite, les alevins émergent et se positionnent dans le courant. L'émergence se produit habituellement de nuit et lorsque les températures journalières varient entre 10 et 20°C. Lorsqu'ils atteignent une longueur de 6,5 cm, on les appelle tacons (Bernatchez et Giroux, 1991).

2.2.4 Développement du juvénile et choix d'habitat

Dès qu'ils ont émergé, les jeunes alevins se dispersent et commencent à sélectionner leur territoire. En se laissant tranquillement emporter vers l'aval du cours d'eau par le courant, ceux-ci recherchent un habitat apte à subvenir à leurs besoins. Selon leur grosseur, on pourra les retrouver en des sites de diverses profondeurs. Selon Heggenes (1996), les jeunes saumons peuvent occuper toute une gamme de profondeurs allant de 5 à 300 cm mais, ceux-ci sont généralement retrouvés dans des zones plus profondes que 20 cm et éloignées des berges où il y a une compétition accrue avec la truite brune dans les zones peu profondes. Bley (1987) mentionne que, lors d'une expérience en laboratoire où un cours d'eau avait des profondeurs de 5 à 27 cm, les juvéniles de moins de 6,5 cm se maintenaient dans des profondeurs d'environ 5 à 9 cm. D'autres chercheurs ont observé de petits tacons (4 à 7 cm) dans des profondeurs allant de 10 à 15 cm. Bley mentionne que plus le jeune

saumon est gros, plus il a tendance à se tenir dans des régions plus profondes mais cette règle ne semble pas absolue (Heggenes, 1996). En ce qui concerne le choix d'habitat au niveau des vitesses de courant, il semble que les petits tacons évitent les sections du cours d'eau où l'écoulement est lent ($<0,05-0,10$ m/s). Les vitesses généralement choisies varieront entre 0,20 et 0,40 m/s de vitesse (moyenne verticale) ou entre 0,20 et 0,65 m/s de vitesse de surface (Heggenes, 1996).

Dans les cours d'eau, il existe souvent une certaine corrélation entre la profondeur d'eau et la vitesse ce qui peut expliquer la vaste gamme d'habitats utilisés par le saumon, en particulier pour les plus gros tacons. Dans les cours d'eau plus larges, l'hétérogénéité latérale est considérable avec des zones moins profondes pour les plus petits tacons sur les rives. Les tacons plus gros peuvent quant à eux, se déplacer latéralement vers des habitats plus spacieux vers le centre du cours d'eau, des lieux qui ont tendance à être plus profonds et à posséder des vitesses d'écoulement plus rapides. Dans les cours d'eau moins larges, l'hétérogénéité longitudinale des habitats est peut-être plus importante ce qui a pour effet que les petits tacons utiliseront les zones de haut-fonds. Les tacons plus gros se déplaceront longitudinalement pour trouver plus d'espace vers les zones de mouilles et de fosses pour leur fournir des habitats plus profonds et où la vitesse d'écoulement est plus élevée. Si l'on considère la position d'attente du tacon (généralement près d'une roche ou d'un bloc), celui-ci choisira diverses vitesses au nez en fonction de sa grosseur. Les petits tacons (< 7 cm) choisiront des vitesses de 0,02 à 0,20 m/s, les tacons intermédiaires (7-10 cm) se maintiendront dans les zones de 0,03 à 0,25 m/s et les gros tacons (> 10 cm) préféreront les zones de 0,05 à 0,25 m/s (Heggenes, 1996).

Lors de leur sélection d'habitat, les jeunes saumons choisissent aussi un certain type de substrat leur permettant soit de se reposer en attendant le passage de leurs proies ou bien de se cacher de leurs prédateurs. Le substrat choisi sera bien souvent, comme la vitesse et la profondeur, dépendant de la grosseur du tacon. Les jeunes tacons se retrouvent rarement dans les habitats où le substrat est très fin ($< 1-2$ cm) et utilisent plutôt un substrat de

cailloux et de galets. Les petits tacons qui ont entre 4 et 7 cm et d'âge 0+, semblent préférer un substrat de graviers et de cailloux dont les diamètres sont de 1,6 à 6,4 cm. Les tacons plus gros qui ont jusqu'à 8-9 cm vont préférer un substrat avec un diamètre supérieur à 6,4 cm. Les plus gros iront jusqu'à utiliser un substrat plus gros (diamètre > 25,6 cm) (Bley, 1987). Heggenes mentionne quant à lui des gammes plus étendues comme des valeurs de diamètre de 2 à 30 cm pour les petits tacons et de 10 à 50 cm de diamètre pour les tacons plus gros. Un substrat hétérogène semble cependant très important car cela permet aux individus de se trouver une roche de résidence (« home rock ») où ils peuvent se reposer tandis qu'en hiver, les tacons se cachent dans les interstices entre les roches pour se protéger.

Dans les cours d'eau plus larges, la vitesse du courant et le substrat sont les variables qui sont les plus importantes quant au choix d'habitat par le tacon. La profondeur de l'eau est plus importante dans les cours d'eau plus petits car les profondeurs plus grandes s'y retrouvent en moins grande abondance que dans les rivières plus larges (Heggenes, 1996). La figure 2.1 montre un exemple de ce à quoi peuvent ressembler les courbes de préférences des trois variables décrivant l'habitat du tacon.

2.2.5 Passage du stade tacon au stade saumoneau

Les tacons demeurent dans le cours d'eau jusqu'à ce qu'ils atteignent de 12,5 à 15 cm de long. Ceci peut prendre deux à trois ans et parfois plus. Les tacons qui n'ont pas atteint la longueur critique au printemps ou au tout début de l'été ne deviendront pas saumoneaux avant le printemps suivant peu importe la croissance qu'ils auront durant le reste de l'été.

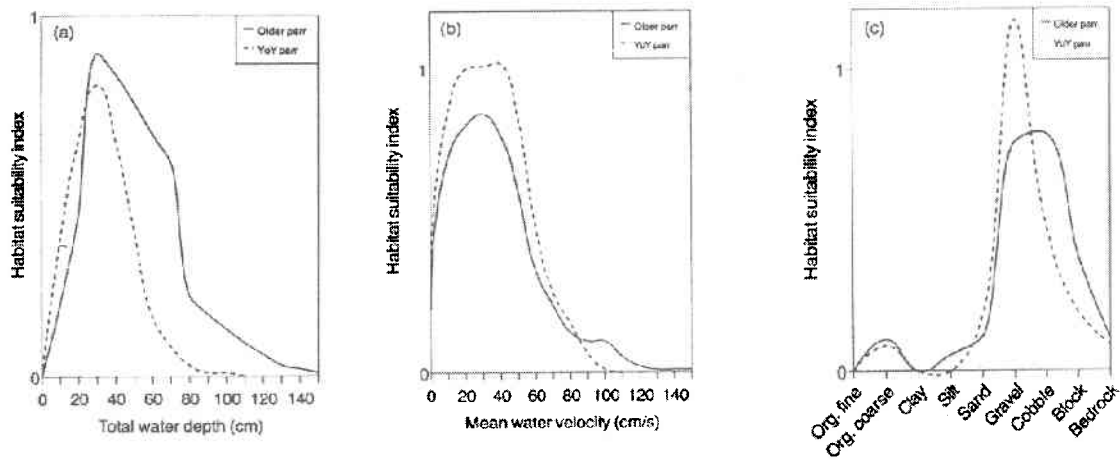


Figure 2.1 : Courbes des indices de préférence d'habitat par le jeune saumon atlantique (*Salmo salar*) dans un cours d'eau norvégien en été. (a) profondeur d'eau. (b) vitesse moyenne du courant. (c) Substrat. (Courbes tirées de Heggenes, 1996)

Bley (1987) mentionne des recherches faisant état du fait que le jeune saumon doit atteindre 10 cm à l'automne pour subir la smoltification l'été suivant. La smoltification est accompagnée d'un changement d'apparence de la part du tacon. Au stade tacon, celui-ci porte des marques caractéristiques très colorées qui lui permet de se confondre dans son environnement. Les saumoneaux sont beaucoup plus minces avec une queue plus longue possédant une fourche plus prononcée et ils sont d'apparence argentée. Avec ces modifications morphologiques surviennent des modifications de type biochimiques et physiologiques. La quantité totale de gras corporel diminue, certains enzymes changent et le tout est accompagné par une perte de glycogène du foie (Bley, 1987). Une enzyme dans les branchies, la $\text{Na}^+\text{K}^+\text{ATPase}$ joue un rôle important dans le maintien de l'équilibre sel-eau chez les poissons anadromes. Cette enzyme catalyse la dérivation de l'énergie pour le transport actif du sel pour les poissons en eau salée. Une augmentation de la synthèse de cette enzyme est donc observée chez le saumoneau alors même qu'il est encore en eau douce.

L'instinct territorial du jeune saumon est dès lors modifié pour devenir un instinct de migration vers l'aval du cours d'eau. Si la migration vers la mer ne se produit pas, le saumoneau redevient tacon et perd son habilité à survivre dans l'eau salée. Cependant, la smoltification se produira à nouveau au printemps suivant. Il semble que le stimulus principal pour le déclenchement du comportement de migration soit une période de température croissante de l'eau. La migration printanière des saumoneaux dure environ une trentaine de jours. Ils atteindront ainsi la mer où ils s'y nourriront pendant un an ou deux avant de revenir frayer dans leur rivière natale.

2.2.6 Alimentation des juvéniles

Le jeune saumon atlantique (juvénile) se nourrit principalement d'invertébrés. Pour ce faire, il choisit un site propice où il trouvera une roche lui permettant de se reposer et de s'abriter au besoin. En demeurant quasi-immobile, celui-ci tente de localiser visuellement ses proies qui sont constituées principalement de chironomides, de libellules, de divers types de coléoptères, de mouches ainsi que d'annélides aquatiques, de crustacés et de mollusques. La diète des tacons 2+ semble principalement d'origine terrestre (54%) (Bley, 1987). L'attaque de la proie confronte le tacon aux courants de dérive et le bilan énergétique de l'exercice doit s'avérer positif à long terme pour permettre la croissance de l'individu. Les meilleurs territoires sont ceux qui maximisent le bilan.

2.2.7 Sources de mortalité

Les sources de mortalité du jeune saumon sont multiples. Diverses variables composant le microhabitat et le macrohabitat peuvent influencer le développement de celui-ci et causer jusqu'à sa mort lorsqu'elles sortent d'une certaine gamme requise par le poisson. Ces

sources sont principalement la température, l'oxygène dissous, le pH, le parasitisme, les maladies ainsi que la prédation.

2.2.7.1 La température

La température est un des éléments influençant le plus la croissance du jeune saumon. Les températures nécessaires à la survie du saumon sont assez basses durant toute sa vie. L'oeuf a besoin d'une température optimale de 6°C (Bley, 1987). Lorsque les températures dépassent 12°C, la mortalité augmente considérablement. La croissance du jeune saumon est optimale à 16,6°C avec une croissance normale se produisant entre 15 et 19°C. Des températures pouvant aller jusqu'à 27°C peuvent être tolérées avant que le saumon tente de rechercher des eaux plus fraîches. Bley mentionne des expériences dans lesquelles le poisson qui avait été préalablement adapté à des températures de 13°C, subissait une mortalité de 50% à l'intérieur de 6 heures lorsque mis en présence d'eau à 26,7°C.

2.2.7.2 L'oxygène dissous

Pour assurer une bonne croissance aux jeunes saumons, les concentrations d'oxygène dissous doivent être près du point de saturation. Un bon développement requiert au moins 6 mg/l et des valeurs jusqu'à 10 mg/l sont idéales (Bley, 1987). La consommation d'oxygène varie chez les poissons selon le sexe, l'âge et le poids. La concentration léthale d'oxygène pour les tacons 0+ est de 1,1 mg/l alors qu'elle est de 2,3 mg/l pour les tacons 1+. La respiration des saumons adultes, quant à elle, est affectée lorsque les concentrations sont inférieures à 4,5-5,0 mg/l. Les cours d'eau ayant une concentration en oxygène dissous de moins de 5 mg/l ne sont généralement pas habités par le saumon (Bley, 1987).

2.2.7.3 Le pH

Pour le pH, la tolérance aux basses valeurs varie selon les différents stades du cycle de vie du poisson. Un haut taux de mortalité des œufs et des alevins a pu être attribué à de faibles valeurs de pH causées par la fonte des neiges (choc acide) ou une grosse pluie (Bley, 1987). Le développement normal des œufs se produit à des pH de 6,6-6,8. L'éclosion ne se produit pas lorsque le pH varie entre 4,0 et 5,5. Les juvéniles subiront certains problèmes à des niveaux de pH bas, par exemple, la régulation ionique ne se fera pas aussi bien et l'asphyxie est possible. Une mortalité indirecte est possible à des pH bas puisque l'abondance des proies dans le cours d'eau en est modifiée et diminuée.

2.2.7.4 Parasitisme et maladie

Une autre cause de décès chez les jeunes saumons est le parasitisme et les maladies. Généralement, les saumons sont affectés par des champignons, des protozoaires, des nématodes, des trématodes, des sangsues, des crustacés et autres. On peut les retrouver à tous les stades de vie du saumon. Certains parasites pourront infecter le saumon seulement lorsque celui-ci est en période de stress. Ce stress peut être causé par des températures élevées, un débit réduit ou la pollution. L'infection par des parasites peut affaiblir le poisson et le rendre vulnérable à d'autres sources de mortalité comme diverses maladies.

2.2.7.5 Prédation

Les jeunes saumons atlantiques sont aussi susceptibles d'être la proie de plusieurs prédateurs. Les anguilles, certaines espèces de truite, des mammifères (e.g. visons), des oiseaux comme le bec-scie et le martin-pêcheur (Bernatchez et Giroux, 1991), sont toutes des espèces qui se nourrissent entre autres des jeunes saumons. Bley (1987) mentionne qu'il a été établi que de 35 à 70% des saumoneaux sont perdus par prédation. Le taux de survie

est meilleur lorsque la distance de migration vers la mer est courte.

2.3 Les modèles

Comme on l'a mentionné auparavant, la modélisation des habitats de poisson requiert l'utilisation successive de deux types de modèles : hydrodynamique et biologique. Les prochaines sections expliqueront le fonctionnement de chacun des modèles et aussi, comment leurs résultats sont mis à contribution afin d'obtenir un indice appelé *APU* (Aires pondérées utiles) correspondant à une mesure de la quantité d'habitats disponibles.

2.3.1 Le modèle hydrodynamique bidimensionnel (HYDROSIM)

Le principal objectif du modèle hydrodynamique est de prédire localement la profondeur, la vitesse d'écoulement moyennée sur la verticale et la surface mouillée pour des événements cibles (débits) dont on ne possède pas de mesure de terrain (Leclerc *et al.*, 1994 ; Heniche *et al.*, 1999). Le modèle est constitué d'une grille d'éléments finis sur laquelle les équations de l'hydrodynamique sont résolues. Les relations utilisées à l'intérieur du logiciel HYDROSIM sont les équations de Saint-Venant. Celles-ci représentent mathématiquement l'écoulement en tenant compte de la conservation de la masse et de la quantité de mouvement. Le modèle tient aussi compte du substrat en le transposant en coefficient de Manning qui est un indice du frottement exercé par le lit de la rivière sur la masse d'eau. Le modèle est de type « couvrant-découvrant » puisqu'il a la capacité de déterminer la position du littoral du cours d'eau en fonction du débit (Leclerc *et al.*, 1994 ; Heniche *et al.*, 1999) et ceci constitue une de ses caractéristiques distinctives. Celle-ci est utile dans les cas (presque toujours) où le milieu possède des frontières mobiles (estuaires à marée, rivières, fleuves) où l'aire mouillée par l'écoulement sera influencée par le régime hydrologique ou le niveau

d'eau. Les prochaines sections permettront de faire un léger survol de la théorie sous-jacente au modèle hydrodynamique à l'intérieur d'HYDROSIM.

2.3.1.1 Les éléments finis et l'élément T-6-3 d'HYDROSIM

L'un des éléments centraux du modèle HYDROSIM est la discrétisation par éléments finis (maillage). Celle-ci consiste en une sub-division du domaine d'écoulement en un certain nombre d'éléments triangulaires qui serviront de support numérique aux données de terrain et aux modèles mathématiques, qu'ils soient hydrodynamique ou biologique. De nos jours, la génération du maillage est effectuée directement à l'aide du logiciel MODELEUR alors qu'il y a quelques années, les éléments étaient dessinés directement sur la carte bathymétrique du cours d'eau ainsi que sur celle du substrat dominant pour être ensuite numérisés. Le logiciel permet à l'utilisateur de retoucher le maillage d'éléments finis à volonté afin de modifier la taille des mailles pour raffiner (en diminuant leur taille) certaines zones où l'on désire plus de précision à des fins de calcul hydrodynamique ou biologiques. La taille des éléments est aussi choisie afin de bien représenter la variabilité morphologique du site à l'étude. En effet, les zones du site où la morphométrie, le substrat, ou les deux changent rapidement, vont requérir des mailles plus petites afin de bien capter les variations en question. Le maillage ainsi obtenu à la fin de cette étape cruciale est celui sur lequel les simulations sont effectuées et l'ensemble des données de terrain qu'il porte constitue le modèle numérique de terrain (MNT).

Dans HYDROSIM, chacun des éléments est constitué de six nœuds (élément T-6-3). Sur chacun des éléments, la topographie et les niveaux d'eau sont assignés aux trois nœuds situés aux extrémités alors que les vitesses moyennes sur la verticale sont assignées à la totalité des six nœuds (figure 2.2).

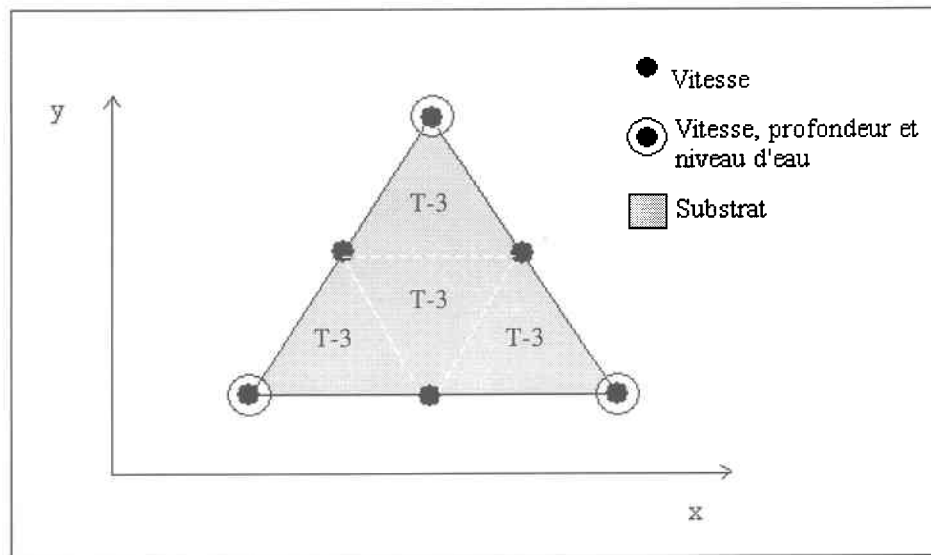


Figure 2.2 : Représentation d'un élément fini de type T-6-3 et des sous-éléments T-3 avec la disposition des variables nodales

La topographie est obtenue en référence avec une cote verticale arbitraire ou connue comme le niveau de la mer. La profondeur est calculée à partir du niveau d'eau qui possède la même référence que la topographie. Le substrat caractéristique d'une certaine zone est quant à lui attribué sur l'ensemble d'un élément et il en est de même pour les macrophytes si ceux-ci sont pris en compte dans le modèle.

L'étape suivante est la résolution des équations de Saint-Venant à l'aide de diverses 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 GMRES pour résoudre le système algébrique. Les aspects numériques particuliers ne seront pas traités ici. La discrétisation permet d'obtenir des valeurs de vitesse verticale moyenne, de niveau d'eau et conséquemment de profondeur partout sur la surface à l'étude en interpolant entre les nœuds. Pour la vitesse, l'interpolation est de type linéaire pour chacun des 4 sous-éléments triangulaires T-3

constituant le T-6-3. Elle est aussi linéaire pour le niveau d'eau et la profondeur mais sur l'ensemble du T-6 (noeuds-sommets).

2.3.1.2 Équations de conservation

Dans HYDROSIM, les équations utilisées sont de forme conservative et les variables d'état primitives de l'écoulement sont les débits spécifiques (q_x , q_y) et le niveau d'eau (Heniche *et al.*, 1999).

En divisant les composantes du débit spécifique par la profondeur, on obtient les vitesses moyennes d'écoulement. De plus, l'intégration temporelle des équations de mouvement locales et instantanées fait apparaître des termes turbulents qu'une loi empirique imparfaite permet de représenter sous la forme de contraintes latérales (compressions et cisaillements turbulents). Cette fermeture du modèle ne permet pas de représenter explicitement les fluctuations temporelles de vitesses observables dans le milieu. Seule leur influence sur les équilibres de force est prise en compte.

Enfin, il est à noter que la représentation discrète du milieu (éléments finis) équivaut à filtrer les fluctuations spatiales de vitesse de taille inférieure à la maille. Seuls les gradients linéaires sont ainsi représentés à condition qu'ils débordent la taille de la maille.

Ces précisions sont importantes quant à la représentativité des champs de vitesse procurés par les modèles hydrodynamiques 2D dans le contexte de la modélisation d'habitats piscicoles.

Équation de conservation de la masse (équations tirées de Heniche *et al.*, 1999) :

$$\frac{\partial [p(h - z_f)]}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (2.1)$$

Équations de conservation de quantité de mouvement :

$$\frac{\partial(pq_x)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_x}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{H} \right) + c^2 \frac{\partial h}{\partial x} = F_x \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial(pq_y)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_y q_x}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y q_y}{H} \right) + c^2 \frac{\partial h}{\partial y} = F_y \quad (2.3)$$

$$F_x = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{xy}) - \tau_x^b + \tau_x^s \right) + f_c q_y \quad (2.4)$$

$$F_y = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{yx}) + \frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{yy}) - \tau_y^b + \tau_y^s \right) - f_c q_x \quad (2.5)$$

Les composantes de vitesse $u(u,v)$ sont alors :

$$u=q_x/H \text{ et } v=q_y/H \quad (2.6)$$

L'effet de la force de Coriolis doit être pris en compte dans les cas où l'on est en présence de cours d'eau de dimension importante. Le facteur de Coriolis f_c est donné par :

$$f_c = 2\omega \sin \phi \quad (2.7)$$

Les composantes de contrainte τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{yx} et τ_{yy} sont la combinaison des contraintes moléculaires et de Reynolds. Elles sont représentées de la façon suivante :

$$\frac{1}{\rho} \tau = (v + v_t) \begin{bmatrix} 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x}{H} \right) & \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_y}{H} \right) \\ \text{symétrique.} & 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y}{H} \right) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

La viscosité cinématique turbulente ν_t peut avoir une valeur constante ou dépendre du gradient de vitesse de l'écoulement :

$$\nu_t = l_m^2 \sqrt{2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2} \text{ avec } l_m = \lambda H \quad (2.9)$$

Les contraintes de surface τ_x^s et τ_y^s agissent seulement sur les zones mouillées lorsqu'un vent souffle. Les contraintes sont exprimées comme étant le produit entre un coefficient de friction et une forme quadratique de la vitesse du vent (Heniche *et al.*, 1999) :

$$\frac{\tau_x^s}{\rho} = C_f^s |\vec{w}| w_x \text{ et } \frac{\tau_y^s}{\rho} = C_f^s |\vec{w}| w_y \text{ avec } C_f^s = pc_w \left(\frac{\rho_a}{\rho} \right) \quad (2.10)$$

$$c_w = 1,25 \times 10^{-3} w^{-1/5} \quad \text{si } |w| < 1,0 \text{ m/s}$$

$$c_w = 0,50 \times 10^{-3} w^{-1/2} \quad \text{si } 1,0 \text{ m/s} \leq |w| < 15,0 \text{ m/s} \quad (2.11)$$

$$c_w = 2,60 \times 10^{-3} \quad \text{si } |w| \geq 15,0 \text{ m/s}$$

Pour les contraintes de fond τ_x^b et τ_y^b , la formule de Manning-Chézy est étendue à deux dimensions pour donner :

$$\frac{\tau_x^b}{\rho} = C_f^b |q| q_x \text{ et } \frac{\tau_y^b}{\rho} = C_f^b |q| q_y \text{ avec } C_f^b = \frac{n^2 g}{H^{7/3}} \quad (2.12)$$

où n est le coefficient de Manning. Il définit la résistance à l'écoulement par divers facteurs comme le substrat (b), les macrophytes (m) et la glace (i) :

$$n^2 = n_b^s + n_m^2 + n_i^2 \quad (2.13)$$

En pratique, si on exclut les macrophytes (n_m) et l'effet de la glace (n_i), le coefficient de Manning varie généralement de 0,02 pour un lit lisse (sable) à 0,05 pour un lit rugueux (gros substrat) (Heniche *et al.*, 1999). Entre deux extrêmes, la loi constitutive suivante est utilisée :

$$\frac{1}{n} = 34,9 \left[-\log(d_{50}) \right]^{0,31} + 0,0017 \quad (2.14)$$

- ω = Taux rotationnel de la Terre ($0,7292 \times 10^{-4}$ rad/s)
- ϕ = Latitude du site à l'étude
- c = Vitesse de l'onde de vague ($c = \sqrt{gH}$)
- p = Porosité
- ν_t = Viscosité turbulente cinématique
- n = Coefficient de Manning
- f_c = Facteur de Coriolis
- H = Profondeur d'eau ($=h-z_f$)
- l_m = Longueur de mélange
- λ = Coefficient de calibration
- z_f = Niveau du lit
- g = accélération gravitationnelle ($9,806 \text{ m/s}^2$)
- h = Niveau de surface
- u, v = Composantes de la vitesse de l'eau intégrés verticalement
- q_x, q_y = Composantes du débit spécifique
- w_x, w_y = Composantes de la vitesse du vent
- ρ = Masse volumique de l'eau (1000 kg/m^3)

- ρ_a = Masse spécifique de l'air (1,2475 kg/m³)
 x, y = Coordonnées cartésiennes
 c_w = Coefficient de traînée de vent
 d_{50} = Dimension granulométrique (m)

2.3.1.3 Les conditions initiales et aux limites

Les conditions initiales servent à démarrer le programme HYDROSIM en conditions transitoires ou permanentes. Celles-ci ne sont théoriquement pas nécessaires pour un écoulement considéré comme quasi-permanent mais elles sont utiles pour accélérer la convergence vers une solution finale. Les diverses étapes d'itérations résultent en des états convergés qui sont ensuite réinjectés pour l'itération suivante. Le résultat final est donc indépendant des conditions initiales. Le pas de temps de la simulation est considéré comme long pour assurer la stationnarité.

En ce qui concerne les conditions aux limites, il existe deux façons possibles d'inclure celles-ci pour effectuer la simulation hydrodynamique. Ces conditions aux limites assureront l'unicité de la solution. D'abord, on peut exécuter une simulation de type niveau - niveau. Ceci consiste à imposer des niveaux d'eau à l'amont du tronçon ainsi qu'à l'aval. La deuxième méthode de simulation consiste à injecter un débit en amont plutôt qu'un niveau d'eau. On dit alors que les conditions aux limites sont de type débit - niveau. Finalement, des vitesses tangentielles nulles sont assignées aux frontières ouvertes du domaine d'écoulement afin de contraindre les vitesses dans la direction normale. Le module couvrant-découvrant assure des vitesses tangentielles aux frontières latérales.

2.3.1.4 Calibration et validation du modèle hydrodynamique

La calibration est habituellement effectuée à partir de données recueillies sur le terrain. Elle consiste en un ajustement de certains paramètres de simulation. Ceux-ci sont

essentiellement les paramètres de frottement (« n » de Manning) et de viscosité turbulente (coefficient numérique de viscosité turbulente) pour un événement hydrologique de référence (Leclerc *et al.*, 1994). Cet événement de référence sera généralement un débit observé sur le cours d'eau à l'étude pour lequel des valeurs de niveaux d'eau ainsi que de vitesses ont été recueillies. On compare les valeurs simulées avec les observations et on modifie les paramètres jusqu'à ce que l'on obtienne des résultats assez semblables. Dans HYDROSIM, la paramétrisation du frottement prend appui sur les mesures du substrat et une relation empirique construite sur l'expérience de l'équipe par rapport aux cours d'eau alluvionaire est utilisée (2.14). En conséquence, la calibration demeure habituellement une opération assez simple qui conduit directement à la validation. Par la suite, d'autres événements indépendants de celui ayant servi à la calibration seront simulés et les résultats seront encore une fois comparés avec les données recueillies sur le terrain. Si la comparaison est satisfaisante, ce qui est habituellement le cas, le modèle sera ainsi validé.

2.3.2 Le modèle biologique

2.3.2.1 Le microhabitat

Le modèle biologique consiste d'abord à choisir une espèce cible (le saumon atlantique (*Salmo salar*) dans notre cas) et de déterminer les préférences d'habitat du poisson pour une ou plusieurs phases de son cycle de vie, le plus souvent celles démontrant une sensibilité au débit. Dans la présente recherche, la phase étudiée sera le stade tacon du saumon atlantique lorsque celui-ci est en période d'alimentation (le cycle de vie du saumon sera expliqué plus loin). Les variables d'habitat sur lesquelles le modèle peut être bâti peuvent être séparées en deux groupes (Nestler *et al.*, 1989). Le premier groupe est constitué de variables pouvant changer de façon significative latéralement et longitudinalement dans un cours d'eau comme la profondeur, la vitesse moyenne verticale ainsi que le substrat et le couvert. Le deuxième groupe consiste en des variables qui ne changent habituellement pas latéralement mais qui peuvent changer longitudinalement comme l'oxygène dissous, la température et

d'autres paramètres de qualité de l'eau. Ce sont les variables de microhabitat pour le premier groupe et celles du macrohabitat pour le deuxième groupe.

2.3.2.2 L'habitat préférentiel

La technique de modélisation des habitats utilisée généralement est appliquée aux microhabitats. Il s'agit de déterminer des indices de préférence d'habitat pour le poisson pour certaines valeurs de vitesse, de profondeur et de substrat. Il est bien important de se rappeler que ces indices de préférence sont établis pour une espèce en particulier et pour une certaine période de l'année, généralement l'été. Heggenes et Salveit (1990) ont observé un changement des préférences selon les saisons au niveau de la vitesse moyenne verticale et de la profondeur. Cette variation serait attribuée aux changements de débit ainsi que de température. En hiver, Cunjak (1988) a même observé un comportement de réponse photonégative, c'est-à-dire que le poisson sortira pour aller se nourrir principalement la nuit alors qu'il a un comportement inverse durant l'été. La façon de déterminer les indices de préférence sera traitée plus loin.

2.3.2.3 La vitesse du courant comme facteur d'habitat

Un des premiers questionnements que le modélisateur doit effectuer concerne la vitesse à mesurer afin de bien représenter le choix préférentiel du poisson. Certains chercheurs vont préférer mesurer la vitesse au nez du poisson. Celle-ci est généralement utilisée pour les poissons benthiques et pour les espèces qui se maintiennent surtout au fond près du substrat pour se nourrir. D'autres vont lui préférer la vitesse moyenne verticale de la colonne d'eau. C'est généralement le cas pour les salmonidés, plus particulièrement le jeune saumon de l'Atlantique, qui se nourrissent de la dérive. Il faut à ce moment-ci se poser la question suivante : quelle est la vitesse qui gouverne le choix du poisson pour un certain territoire?

Le comportement du tacon (saumon) peut se résumer à ceci. Lorsqu'il est en quête d'un territoire, il recherche une zone remplissant plusieurs fonctions. Ce doit être un lieu où il peut se cacher des prédateurs, où la compétition n'est pas trop forte (inter- et intraspécifique) afin qu'il puisse garder et défendre son territoire mais c'est d'abord et avant tout un lieu pouvant lui permettre de se nourrir en limitant sa dépense d'énergie. Le tacon se trouve un endroit situé généralement non loin d'un lieu générateur de dérive de nourriture. Il est clair que cette dérive n'est pas prise en compte explicitement dans le modèle mais, elle peut être représentée par une veine de courant un peu plus prononcée, située non loin de l'endroit où se trouve le poisson. Celui-ci se choisit généralement une aire d'attente (embuscade) près d'une roche (« home rock ») à l'intérieur de la zone de décrochement de la couche limite pour éviter de subir le courant ou bien il se cache derrière celle-ci dans le remous. Lorsqu'il voit une proie dériver dans sa direction, c'est à ce moment qu'il quitte sa roche pour nager vers sa proie et qu'il doit fournir le plus d'effort pour combattre le courant. On peut donc se demander si c'est la vitesse au nez au point d'attente qui incite le poisson à choisir son lieu de chasse ou bien si c'est la veine de courant amenant les proies à laquelle il doit se confronter. Si l'on choisit la deuxième réponse, il semble clair que la vitesse au nez n'est pas représentative du choix d'habitat du poisson. Le poisson se déplaçant alors dans la colonne d'eau pour chasser, la vitesse moyenne verticale devient une

meilleure représentation de son choix d'habitat. Bien sûr, l'idéal serait d'obtenir une idée générale des vitesses entourant le poisson ce qui serait une meilleure description de son habitat. Il faudrait pouvoir mesurer plusieurs vitesses autour du lieu d'attente du poisson afin d'avoir une idée de l'hétérogénéité des vitesses dans son territoire. Ce sujet sera abordé à nouveau dans le chapitre 4 et constitue un des thèmes centraux d'investigation auxquels a conduit cette recherche.

2.3.2.4 Disponibilité -vs- utilisation de l'habitat : l'indice de base

Ayant obtenu les diverses données abiotiques où les poissons ont été observés, on a donc la fréquence d'utilisation des différents habitats pour chaque variable. On peut retrouver ces informations sous différentes formes. D'abord, sous forme de courbes où les valeurs des variables abiotiques (vitesse, profondeur et substrat) sont en abscisse alors que la fréquence de poissons observés pour chacune des classes de variables se retrouve en ordonnée. Pour obtenir une courbe de préférence, il est important de pondérer ces dernières avec la disponibilité relative des différents habitats dans le milieu échantillonné.

$$\text{Préférence} = \frac{\text{Fréquence d'utilisation}}{\text{Fréquence disponible}} \quad (2.15)$$

La préférence du poisson pour une variable (indice de base) s'exprime par la sélectivité qu'il manifeste à l'égard d'un ensemble de conditions disponibles dans le milieu. Elle s'obtient par le quotient de la fréquence d'utilisation (valeurs de la variable abiotique aux lieux d'observation de la présence de poisson) sur la fréquence des conditions disponibles (valeurs aux sites de présence et d'absence). Si les deux histogrammes de fréquence étaient semblables, il y aurait absence de préférence. Ce n'est pas le cas habituellement et les deux histogrammes se différencient nettement pour faire ressortir la sélectivité. Le quotient mentionné est habituellement normalisé à 1,0 correspondant au maximum de sélectivité.

L'indice final varie donc entre 0 (mauvais habitat ou condition limitante) et 1 (excellent habitat ou condition satisfaite) selon que les conditions sont celles où aucun poisson n'a été observé ou celles où les poissons ont été les plus fréquemment observés (Leclerc *et al.*, 1994).

Ces courbes sont empiriquement établies en recueillant des données aux endroits où il y a présences de poisson ainsi qu'à des endroits pris de façon aléatoires afin de connaître la disponibilité des conditions. Dans le cadre du présent projet, la disponibilité brute des conditions abiotiques provient directement du modèle hydrodynamique ce qui, en plus de refléter bien plus fidèlement l'ensemble de toutes les conditions disponibles dans le milieu à débit donné, a l'avantage de réduire les besoins de caractérisation aux seuls lieux d'observation de la présence de poissons. Pour ce faire, une bonne validation du modèle est cependant nécessaire. Ceci permet donc de concentrer (augmenter) les efforts de terrain sur les lieux où le poisson est présent sans avoir à recueillir des données en des lieux où il est absent.

2.3.2.5 Indice global d'habitat

Les indices de base d'habitat obtenus précédemment sont regroupés sous la forme d'un indice global d'habitat reliant les trois variables abiotiques en un seul indice. Les trois indices peuvent être combinés à l'aide d'une approche algébrique de moyenne géométrique pondérée (méthode classique). Voici la forme que prend cette formule algébrique :

$$I_G = \alpha * I_P^{a_P} * I_V^{a_V} * I_S^{a_S} \quad \text{avec } a_P + a_V + a_S = 1 \quad (2.16)$$

Où,

I_G	= indice global
I_P, I_V, I_S	= indices de base (profondeur, vitesse et substrat)
a_P, a_V, a_S	= pondération des indices de base
α	= facteur inhibiteur ou atténuateur où, $\alpha = \alpha(T^\circ, C_i, \dots)$ avec T° = température et C_i = concentration en contaminant

L'utilisation de divers exposants permet de pondérer les indices relativement à leur importance dans la définition de l'habitat. On utilise parfois l'analyse factorielle de correspondance pour quantifier ces pondérations (Leclerc *et al.*, 1995).

2.3.2.6 Calcul des aires d'habitat sur un site

La méthode des éléments finis nous permet par interpolation algébrique de savoir la valeur d'une des variables d'habitat en tous points du site à l'étude. Cette distribution spatiale d'une variable peut aussi être convertie à l'aide des courbes de préférences en valeur d'habitat. Par la suite, pour quantifier la disponibilité d'habitat du site à un débit donné, on doit déterminer l'aire pondérée utile (*APU*) qui représente la superficie du cours d'eau pondérée par la valeur locale de l'habitat d'après l'indice global (I_G) ; cette aire est exprimée en termes absolu ou relatif (pourcentage de la superficie totale du milieu modélisé ou *APU%*). Ensuite, il est parfois utile de connaître les aires correspondant à des intervalles de valeurs d'habitat données (I_G) (Leclerc *et al.*, 1994). Pour calculer les *APU* du milieu, la grille d'éléments finis est raffinée afin de rendre les calculs plus faciles. Cette grille est obtenue en subdivisant les éléments T-6 (figure 2.2) en quatre éléments possédant chacun trois nœuds (voir figure 2.3). Les différentes variables d'habitat aux trois nœuds sont d'abord converties en indices globaux à l'aide de l'équation 2.16. Pour obtenir l'*APU* d'un site, il est d'abord nécessaire de calculer les *APUs* de chaque élément e et ensuite, ceux-ci sont sommés sur l'ensemble du maillage du site. Les équations utilisées sont les suivantes :

$$APU^e = \left(\frac{I_{G1} + I_{G2} + I_{G3}}{3} \right) * A^e \quad (2.17)$$

$$A^e = \frac{1}{2} \left[(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1) \right] \quad (2.18)$$

$$APU = \sum_{e=1}^{NE} APU^e \quad (2.19)$$

Où,

I_{G1}, I_{G2}, I_{G3} = indice global de chaque nœud de l'élément T-3

A^e = aire de l'élément e

x, y = coordonnées

NE = Nombre d'éléments T-3 du domaine d'écoulement

On peut ensuite normaliser la valeur d' APU à l'aide de la superficie du site (A). On obtient la valeur unitaire (relation 2.20) d'habitat du site qui multipliée par 100, s'exprime en pourcentage ($APU\%$).

$$\overline{IG} = \frac{APU}{A} \quad (2.20)$$

$$APU\% = \frac{APU * 100}{A} \quad (2.21)$$

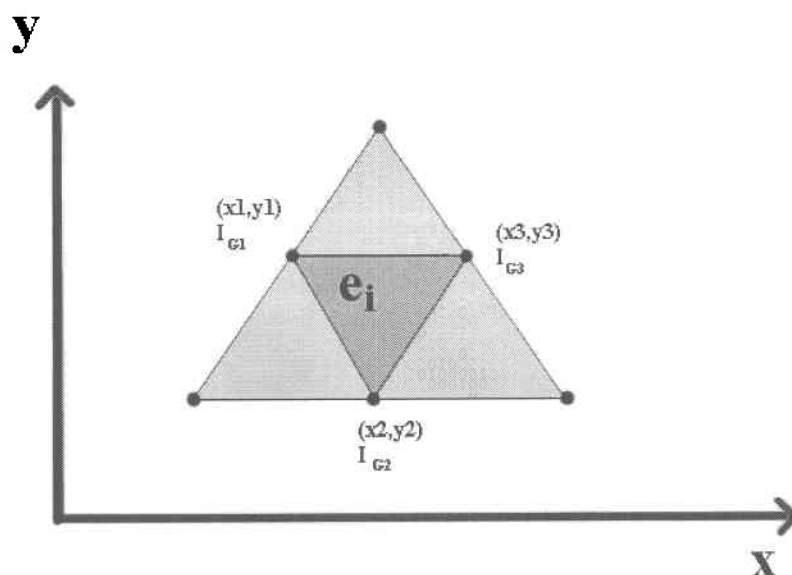


Figure 2.3 : Représentation d'un élément de type T-3 après subdivision à partir d'un élément T-6

2.4 Résumé de la méthode

Le cycle de vie du saumon atlantique en est un très complexe et, encore aujourd'hui, plusieurs phénomènes demeurent inconnus des chercheurs. Il est certain que le saumon est une espèce très importante économiquement et son étude doit se poursuivre. La modélisation des habitats est une façon de tenter d'assurer sa survie en étant sûr que lorsque l'on projette de modifier la structure d'une rivière par l'implantation d'ouvrages de génie civil ou divers aménagements, les habitats seront conservés.

On peut résumer la technique classique de modélisation des habitats de poisson par le diagramme représenté à la figure 2.4. Nous verrons dans la section suivante, les changements que l'on compte apporter à cette méthode afin de réduire l'effort de terrain nécessaire à la réalisation d'une étude sur les habitats du saumon juvénile.

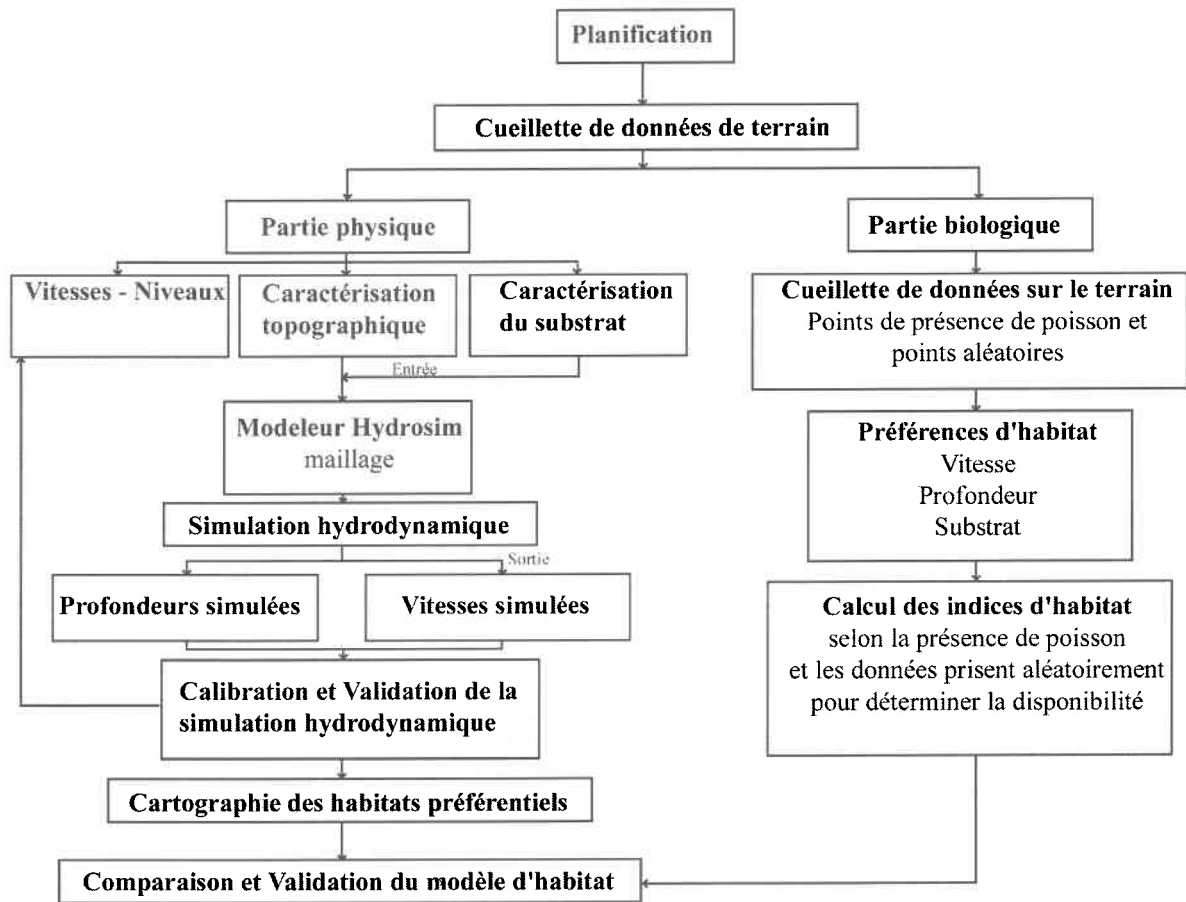


Figure 2.4 :Diagramme représentant la méthode classique de modélisation des habitats.

3. CAMPAGNE DE TERRAIN

3.1 Démarche

Pour modéliser les habitats de poissons, une démarche classique adoptée par nombre de chercheurs forme maintenant l'état de l'art. Cette démarche classique a été présentée au chapitre précédent à la figure 2.4. Dans le cadre du présent projet, l'un des buts fixés est d'adapter la procédure de création des courbes de préférences d'habitat en utilisant les résultats des simulations hydrodynamiques pour évaluer la disponibilité de conditions abiotiques. La méthode classique consistait à collecter les données (vitesses, profondeurs et substrat) partout sur la rivière afin de reproduire le plus fidèlement possible la gamme des conditions présentes (donc la disponibilité de conditions). Dans ce cas-ci, il s'agit de substituer à la caractérisation directe, un apport de données prédites en provenance du modèle hydrodynamique du moins en égard aux vitesses et aux profondeurs. Le but est de rentabiliser davantage les résultats du modèle tout en économisant sur l'effort de terrain.

D'autre part, la caractérisation des vitesses réalisée en vue d'établir la fréquence d'utilisation par le poisson pouvait aussi être davantage rentabilisée en servant à la calibration et à la validation du modèle hydrodynamique. Le diagramme de la figure 2.4 deviendrait donc celui présenté à la figure 3.1. Pour bien comprendre la différence, la figure 3.2 montre une simplification des deux méthodologies. Le présent projet ayant été réalisé conjointement par deux équipes de recherche du CIRSA, une des équipes, la nôtre, s'est occupée des simulations hydrodynamiques et a analysé les résultats obtenus en condition d'étiage, et l'autre équipe a déterminé les préférences d'habitat en utilisant les données de simulation que nous leur avons procurées (U. de Montréal).

Revenons sur la méthodologie. La modélisation des habitats peut être subdivisée en cinq grandes étapes : la campagne de terrain (caractérisation de la rivière et des conditions présentes), les simulations hydrodynamiques de calibration et de validation, la détermination des indices de préférences d'habitat, l'étape de validation du modèle d'habitat (comparaison de ce que le modèle d'habitat donne avec les observations sur le terrain) et enfin les simulations prédictives de l'hydrodynamique et des habitats dans les gammes de conditions non-observées (débits extrêmes, aménagements). Les deux avant-dernières étapes (préférences et caractérisation biologiques), bien que mentionnées, ne font pas partie intégrante du présent travail. Elles seront rapportées par l'équipe de l'Université de Montréal (Jean-Christophe Guay). Quant à l'étape prédictive, elle fait habituellement partie de projets appliqués (détermination de débits réservés, par exemple).

Dans ce chapitre, nous allons rapporter les activités réalisées conduisant à l'obtention de simulations hydrodynamiques validées pour les événements hydrologiques ayant servi à établir les fréquences d'utilisation du milieu par le tacon.

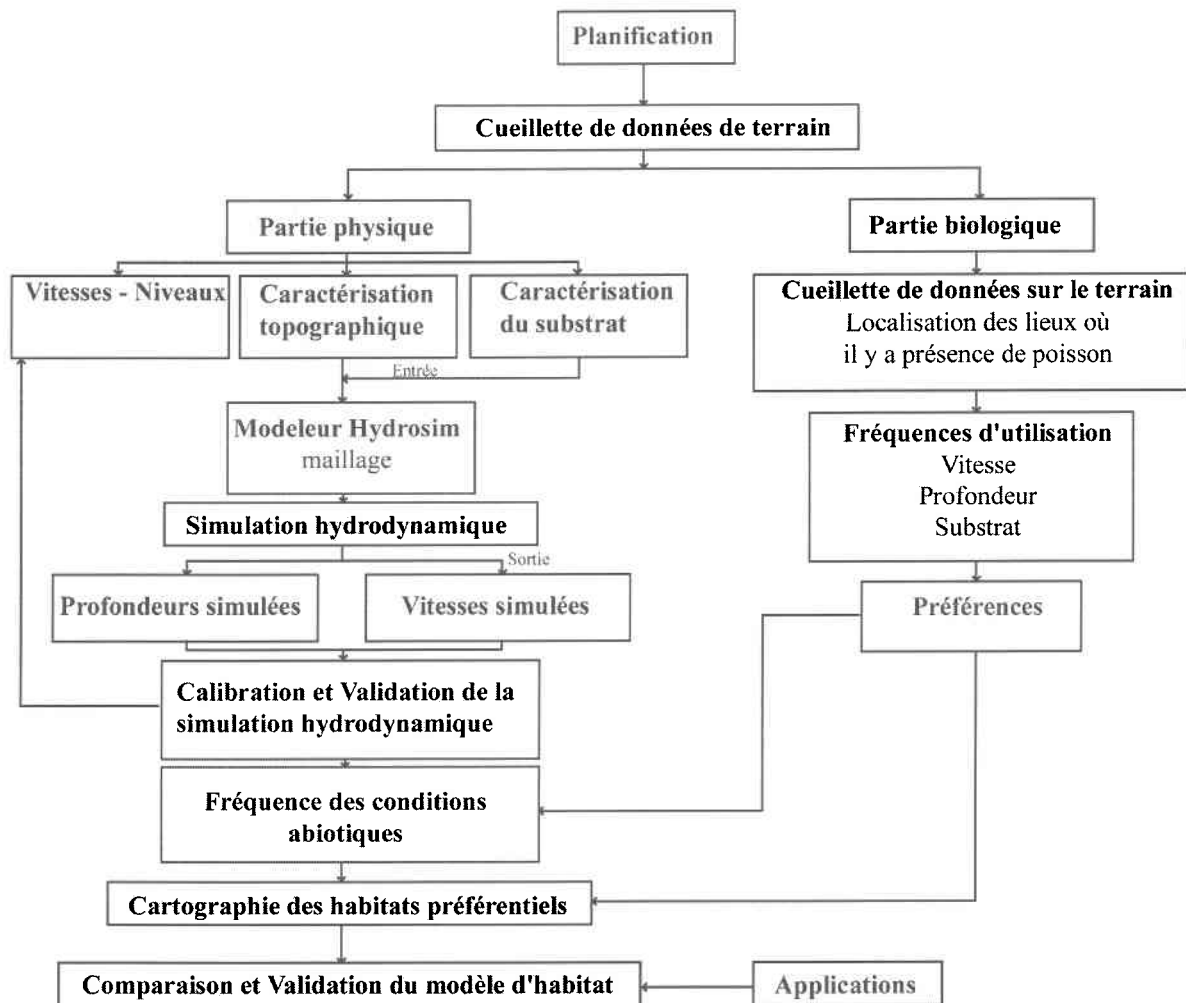


Figure 3.1 :Diagramme représentant la nouvelle méthode de modélisation des habitats qui se sert du modèle numérique de terrain pour déterminer les indices d'habitat.

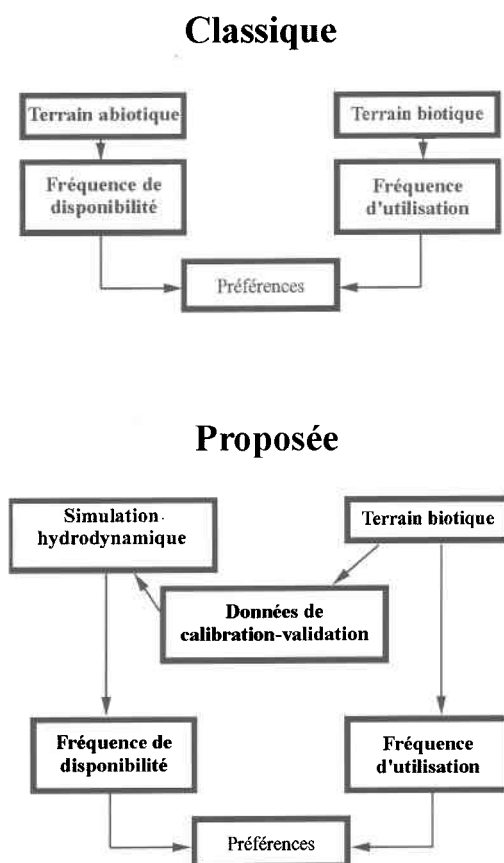


Figure 3.2 :Diagrammes représentant une version simplifiée de la méthode classique et proposée s'inscrivant dans la méthodologie plus vaste présentée dans les figures 2.4 et 3.1.

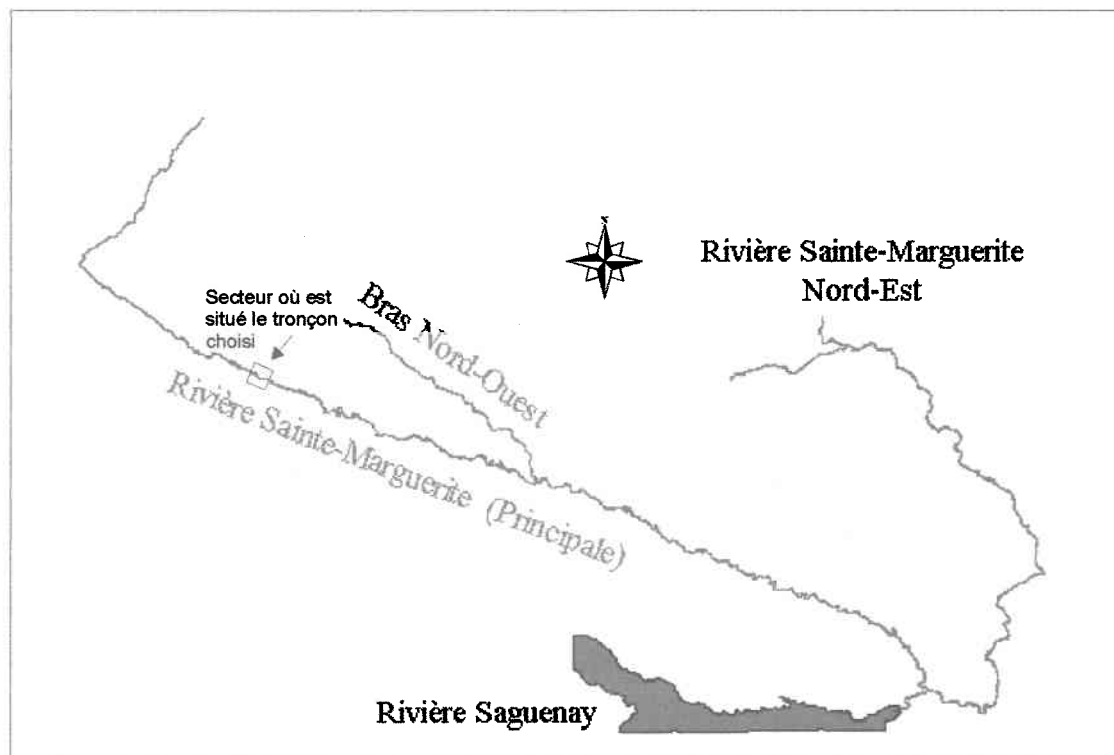
3.2 Caractérisation du terrain

La campagne de terrain réalisée au cours de l'été 1997 s'est déroulée sur une période s'étendant de la mi-juin jusqu'à la fin du mois d'août soit la période d'alimentation des jeunes saumons atlantiques. Le travail effectué durant cette période comprend deux parties :

1. Une caractérisation physique du tronçon choisi : (topographie, substrat, niveaux)
2. Une prise de données de types abiotiques aux sites de présence de tacons (0+ à 3+) de saumon atlantique (*Salmo salar*) : (vitesses, profondeurs, substrat)

3.2.1 La rivière Sainte-Marguerite et le CIRSA

Mis à part le lac St-Jean et ses tributaires, la rivière Sainte-Marguerite est le principal affluent de la rivière Saguenay et elle s'y déverse à environ 25 km à l'amont de Tadoussac. Elle est constituée de trois branches, soit : la principale, la nord-est et la nord-ouest. La branche principale fait 92 km de long et est longée par la route 172 qui l'entrecoupe sur plus de 30 km (voir figure 3.3). La rivière Sainte-Marguerite est une rivière très importante en ce qui concerne la ressource saumon atlantique et c'est la raison pour laquelle elle est très étudiée. Pour ce faire, un organisme regroupant plusieurs universités québécoises a été créé afin d'aider à la conservation de cette importante ressource. Le CIRSA (Centre Inter-universitaire de Recherche sur le Saumon Atlantique) regroupe des équipes de recherches réparties dans quatre domaines différents : structure démographique des populations, génétique des populations, réseaux trophiques, et qualité des habitats. Le présent projet s'insère dans le cadre de ce dernier domaine de recherche et a été possible grâce au dévouement et à l'aide apportée par le CIRSA.



**Figure 3.3 :Représentation de la rivière Sainte-Marguerite avec ses trois branches :
Principale, Nord-Est et Nord-Ouest.**

3.2.2 Choix du tronçon à l'étude

La première étape de modélisation des habitats d'alimentation des tacons consiste à trouver un site caractéristique de la morphologie et des habitats de la rivière (habituellement un site très utilisé par le saumon) qui sert à déterminer les indices de préférences des tacons du saumon présents dans la rivière. Il faut donc rechercher un site contenant idéalement des méandres, des fosses, des seuils et des rapides afin de bien représenter l'ensemble des faciès morphologique de la rivière et de ne pas introduire de biais dans l'évaluation des préférences (voir le point numéro (4) des conditions mentionnées par Orth et Maughan (1982) à la page 7). Il est cependant bon de noter que la période de prise de données se

à l'étiage, ce qui limite la représentativité hydrologique. À cet égard, l'utilisation d'un modèle hydrodynamique prédictif peut compenser cette lacune. Le site retenu est une portion de la rivière Sainte-Marguerite se trouvant entre la fosse 59 et la fosse 62 (les fosses sont des zones d'eau plus profondes où l'on trouve généralement des saumons adultes et ayant été répertoriés à des fins de pêches sportives dans la rivière ; voir figure 3.4). La largeur moyenne du tronçon est d'environ une trentaine de mètres et s'étend sur une longueur d'environ 1,4 km ce qui est largement en accord avec la condition que la longueur d'un tronçon d'étude doit être d'au moins 10 à 14 fois sa largeur pour qu'il soit bien représentatif (Bovee, 1982). De plus, le tronçon retenu est pourvu de méandres et d'une succession de faciès morphologiques (seuils, mouilles, radiers) caractéristiques des cours d'eau alluvionnaires.

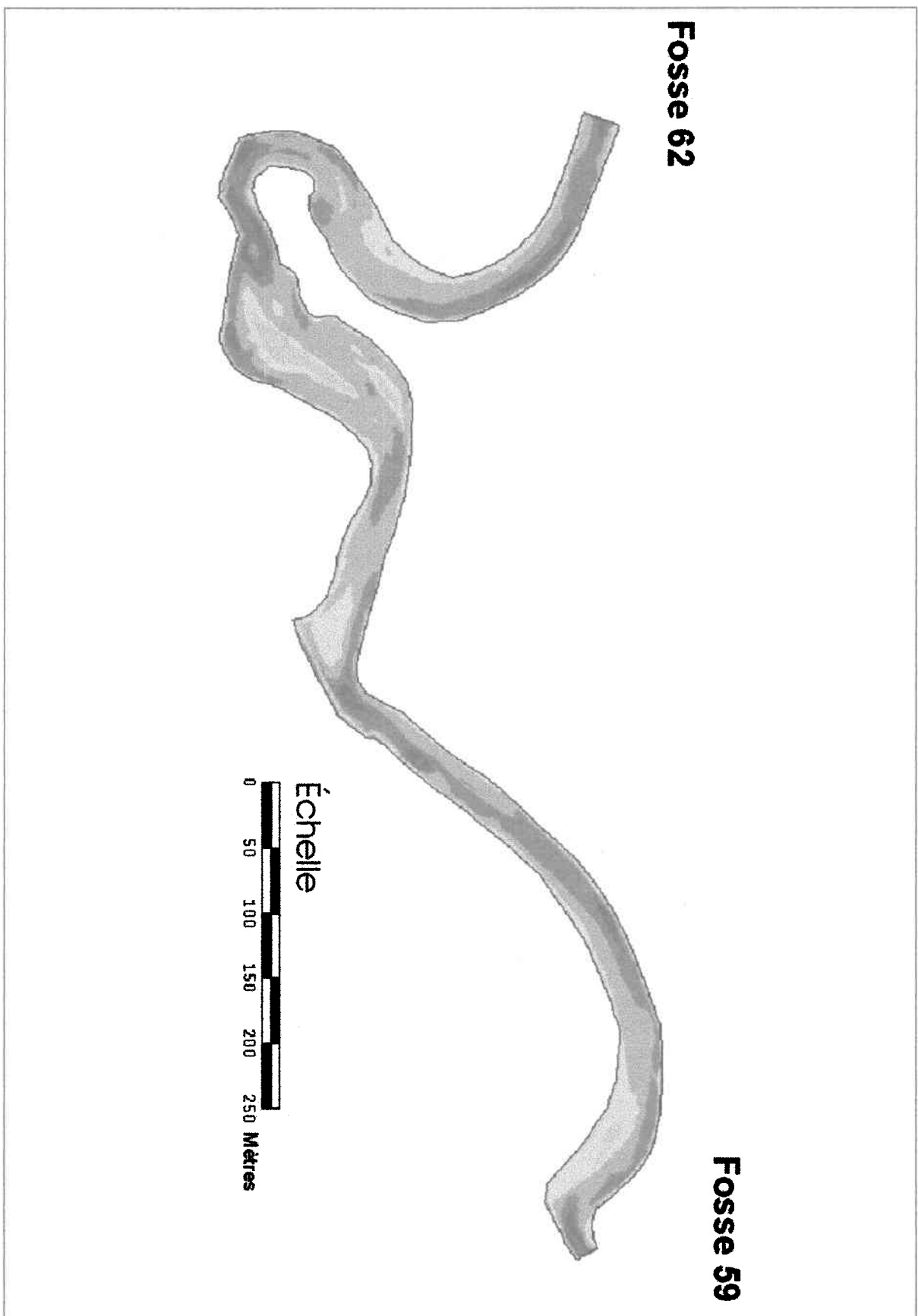


Figure 3.4: Tronçon choisi pour l'étude.

3.2.3 Période de caractérisation

La caractérisation de la topographie et des substrats s'est déroulée lors des trois premières semaines de terrain soit, entre le 21 juin et le 16 juillet 1997 et la prise de données abiotiques sur les tacons a été effectuée durant la période de temps restante jusqu'à la fin du mois d'août soit du 17 juillet au 22 août 1997. Cette deuxième étape a elle-même été subdivisée en plus petites périodes comprenant divers types de manipulations qui seront abordés plus loin.

3.2.4 Établissement d'un système de repérage local

Lorsque le site d'étude est choisi, un système de repérage local (géoréférence) est installé afin de permettre de se situer sur le tronçon tout au long de la campagne de terrain. Ce système sert entre autres à recueillir la topographie de la rivière. Le système de repères permet aussi de positionner les bornes de niveau qui servent à mesurer les niveaux d'eau à l'entrée (amont) et à la sortie du tronçon (aval). Finalement, il sert à enregistrer la position géoréférencée des jeunes saumons à l'étape de la caractérisation biologique. Le système de repérage consiste en des tiges métalliques insérés dans le sol. La station totale est installée directement au-dessus de ces repères. La coordonnée cartésienne de chacune des tiges est alors mesurée de sorte à créer le repère local.

3.2.5 Topographie du tronçon

3.2.5.1 Matériel et méthode

Le matériel utilisé pour enregistrer la topographie de la rivière est un théodolite de type station totale de marque Sokkia ainsi qu'une mire formée d'un prisme monté sur une tige

extensible (dans ce cas-ci, deux mires ont été utilisées afin d'accélérer le travail). Pour procéder à la cartographie du cours d'eau, un point de référence est fixé (coordonnées x,y,z) où la station totale est disposée initialement de sorte à créer l'origine du plan cartésien et ensuite la rivière est parcourue à pied (l'ensemble des points où la station était fixé se trouve à la figure 3.5). De la sorte, un des membres de l'équipe opère la station totale alors que deux arpenteurs, munis de mires, parcourent la rivière. La saisie des données s'effectue alternativement de l'un à l'autre permettant ainsi de maximiser l'utilisation de la station totale pendant le déplacement des arpenteurs.

3.2.5.2 Plan de caractérisation

Il est important d'enregistrer une bonne densité de points si l'on veut bien reproduire la topographie de la rivière, car celle-ci est construite en interpolant la valeur z (cote du fond) entre chacun des points récoltés. Si la densité de points recueillis est trop faible et que cette zone de rivière possède plusieurs seuils et mouilles (variation rapide du lit sur une courte distance), la variabilité à petite échelle sera totalement perdue et la morphologie paraîtra moins accidentée qu'elle ne l'est en réalité. Il faut donc savoir juger la bonne densité de points à récolter. Une section de rivière où le lit de la rivière est uniforme requiert une densité de points moindre qu'une section de rivière contenant des fosses, des seuils ou des singularités. De plus, il est important de prendre des points de mesure sur les rives et les berges de façon à bien délimiter les bordures du cours d'eau. Pour la présente recherche, un ensemble d'environ 9500 points de données ont été recueillis comprenant l'élévation (z) et les positions cartésiennes de ces points (x et y) dans un repère local¹. Ceci représente environ un point à tous les $4,4 \text{ m}^2$. Il faut noter ici que dû à l'inexpérience de l'équipe de recherche en matière d'arpentage, le polygone de nivellement n'a pas été refermé afin de valider l'ensemble des points de mesure récoltés. Cette fermeture du polygone de nivellement consiste à partir de l'endroit où la station totale était disposée à la fin du

¹ Il est possible de raccorder le repère local sur le repère global afin d'obtenir la géoréférence mais cela n'a pas été fait.

tronçon et à se redéplacer vers le début du tronçon afin de voir si une erreur sur la topographie ne serait pas apparue au cours de l'arpentage de la rivière.

Toutefois, comme on le verra plus tard, les bons résultats au niveau des profondeurs ainsi que des niveaux d'eau simulés permettent d'affirmer que les incertitudes provenant du polygone de nivellement sont probablement négligeables. La localisation des points de mesure est représentée à la figure 3.6. Cette grande densité de points a été jugée nécessaire afin d'éliminer toute ambiguïté morphologique susceptible de contaminer en incertitudes indésirables les simulations hydrodynamiques subséquentes. En pratique, une densité bien inférieure à celle obtenue ici est considérée comme suffisante.

3.2.5.3 Carte du tronçon

À l'aide du logiciel MODELEUR (Secretan et Leclerc, 1998), on peut faire afficher les mesures topographiques sous la forme d'isosurfaces interpolées entre les points de mesures (voir la figure 3.7). On y distingue divers types de reliefs comme des fosses, des îles, des haut-fonds, des seuils ainsi que des méandres serrés. Dans ce dernier cas, on peut facilement observer que la partie intérieure des méandres à un niveau plus élevé à cause des dépôts de sédiments alors que la partie extérieure à un niveau plus bas dû à un courant plus rapide creusant le lit de la rivière et transportant ainsi les sédiments. La présence de tous ces types de relief permet d'obtenir une meilleure représentativité globale de la rivière à l'intérieur du tronçon choisi comme l'exige l'une des conditions établies par Orth et Maughan (1982).

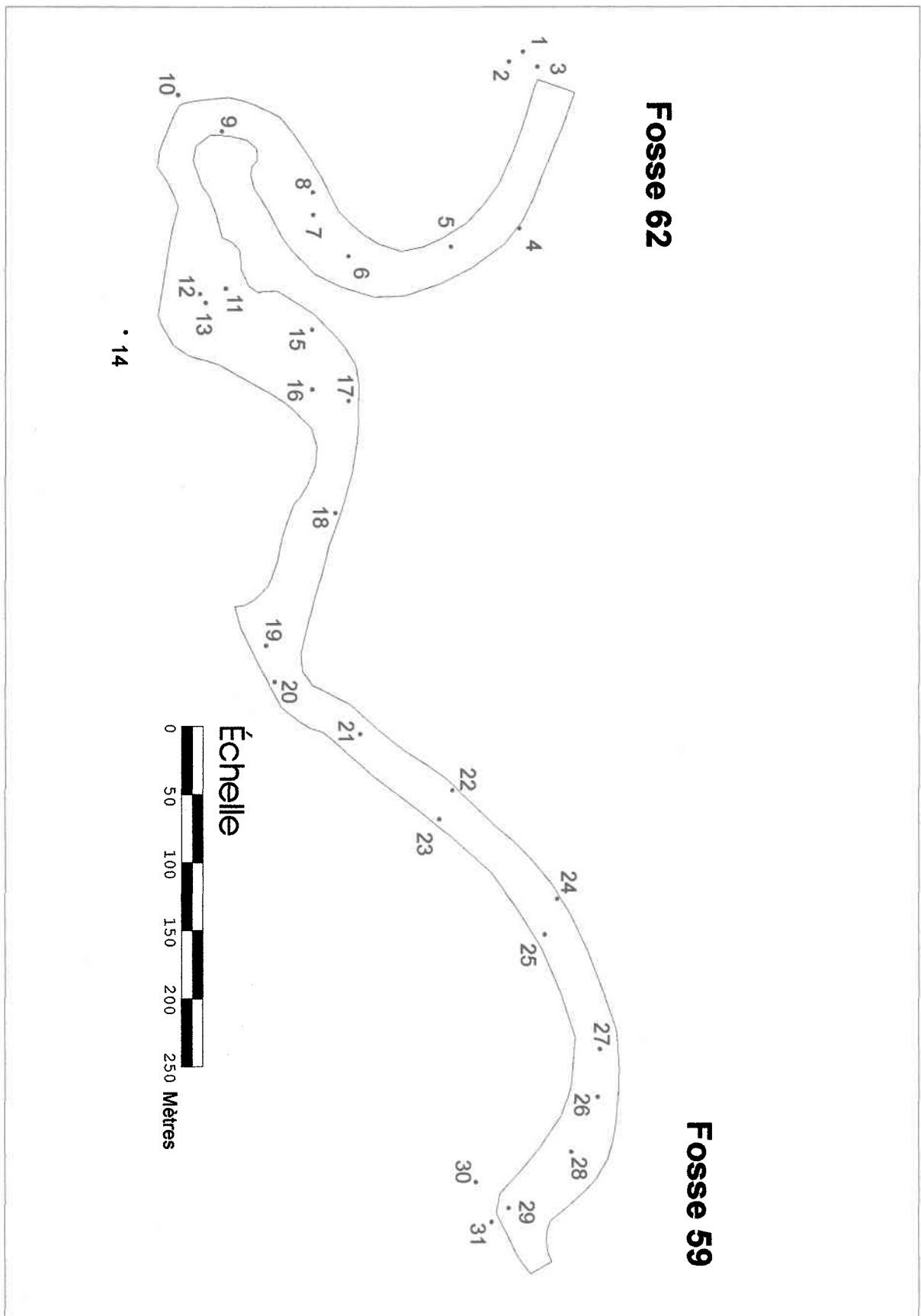


Figure 3.5: Localisation des points du polygone de nivellement.

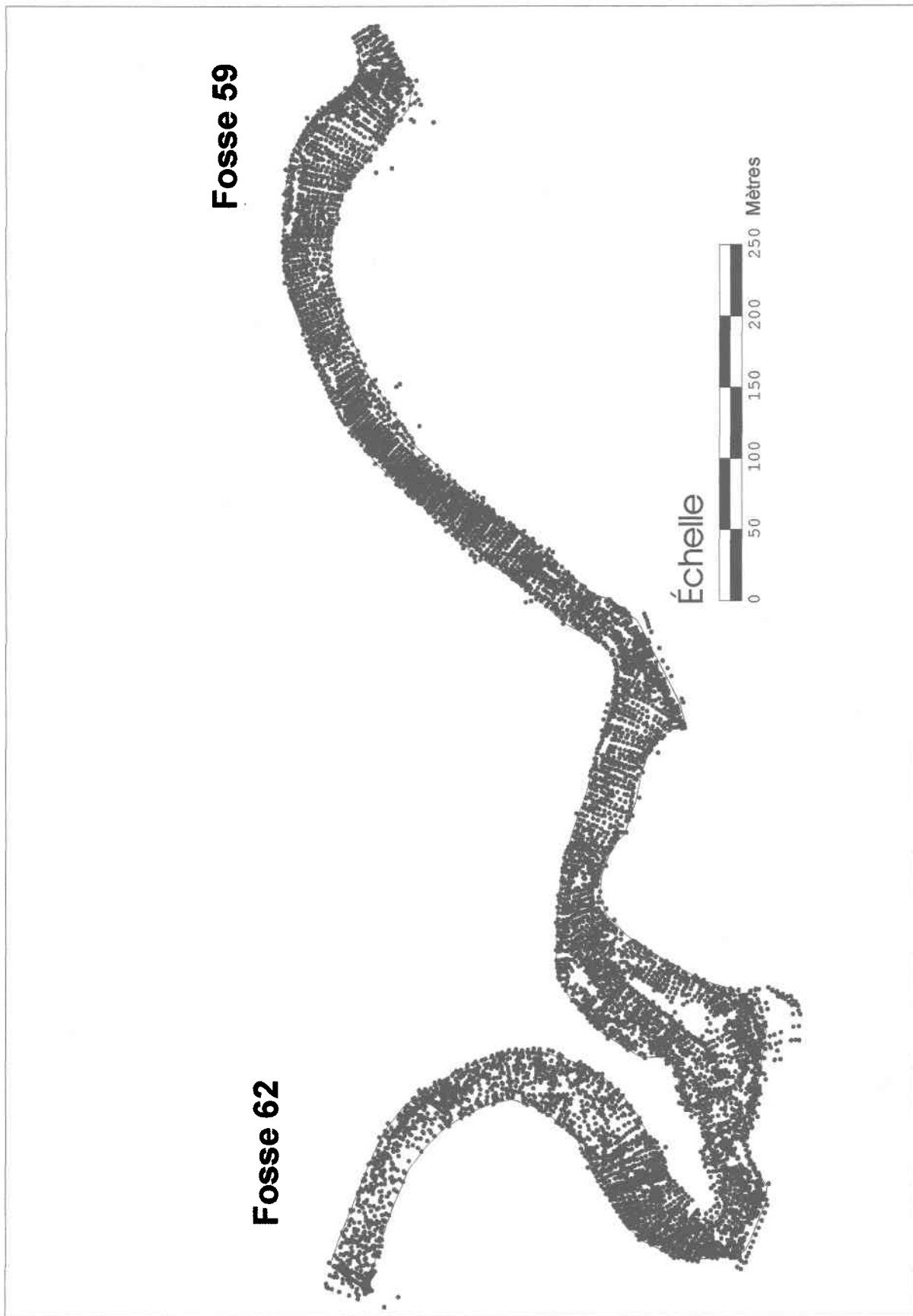


Figure 3.6: Localisation des points de données topographiques recueillis sur la rivière Sainte-Marguerite à l'aide de la station totale.

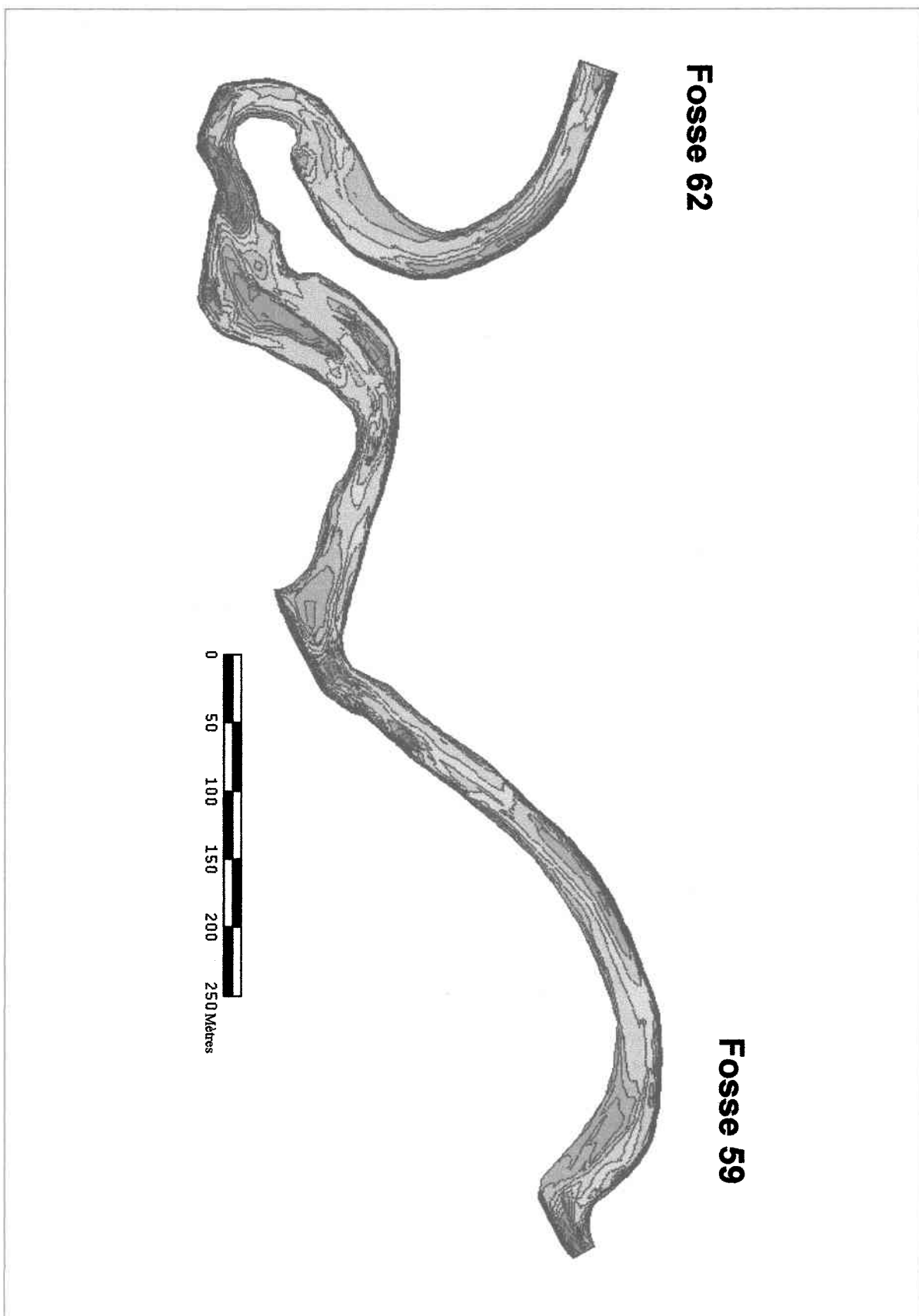


Figure 3.7: Topographie du tronçon à l'étude.

3.2.6 Hydrologie du tronçon

3.2.6.1 Méthodologie de prise des niveaux d'eau

Une méthode simple et peu coûteuse pour connaître l'hydrologie du tronçon consiste à installer des tiges graduées en bois au début et à la fin du tronçon sur lesquelles on peut lire le niveau d'eau. Ces tiges sont insérées dans la rivière près des rives de sorte à ce qu'elles soient facilement accessibles pour les lire à partir de la berge. Il faut cependant s'assurer qu'elles seront dans l'eau à tout moment (en étiage) pour être sûr de pouvoir y lire le niveau d'eau. Ces tiges sont ensuite localisées à l'aide de la station totale et connaissant ainsi la cote z de leur position, le niveau d'eau peut-être connu en additionnant la valeur mesurée sur les graduations à celle de la cote z du fond (les conditions limites doivent être dans le même référentiel que la cote z du fond pour les simulations). Ainsi, les niveaux d'eau ont été mesurés en amont et en aval chaque jour où l'équipe était présente sur le terrain dans le but d'établir le débit au même moment. Ces niveaux d'eau sont utiles à l'étape des simulations, car ils servent de conditions limites permettant d'aider à l'itération numérique des diverses conditions abiotiques formant la simulation hydrodynamique.

3.2.6.2 Méthodologie de prise de débit

Pour connaître les débits correspondant aux niveaux d'eau mesurés, un appareil enregistreur de niveau a été installé sur la rivière un peu en amont de notre tronçon. L'équipe de l'Université McGill du CIRSA récoltait régulièrement les données de niveau enregistrées par la jauge à cet endroit. Pour en connaître la correspondance en débit, il a fallu construire une courbe de tarage débit-niveau. C'est cette même équipe qui s'en est chargée.

La méthode utilisée est celle décrite par Nestler *et al.* (1989). Il s'agit en fait de prendre des mesures de profondeurs suivant un certain intervalle sur toute la largeur de la rivière à l'endroit où la jauge est disposée. Ensuite, on mesure la vitesse moyenne verticale du

courant à l'intérieur de chaque intervalle et on calcule l'aire de celle-ci (voir figure 3.8). En sachant l'aire d'écoulement ainsi que la vitesse moyenne, on peut déterminer le débit spécifique. Le débit total est le cumulatif de tous les intervalles.

Ceci a donc été fait pendant plusieurs jours à divers débits et même en période de crue, afin d'établir la relation débit-niveau d'eau à cet endroit. Les valeurs de débit obtenues pour chacun des niveaux d'eau mesurés par la jauge sont données dans le tableau 3.1. Ces valeurs ont été mises en graphique par l'ajustement d'une courbe polynomiale (voir figure 3.9). Cette courbe de tarage a ensuite permis de procéder à la conversion de la série de niveau en série hydrologique.

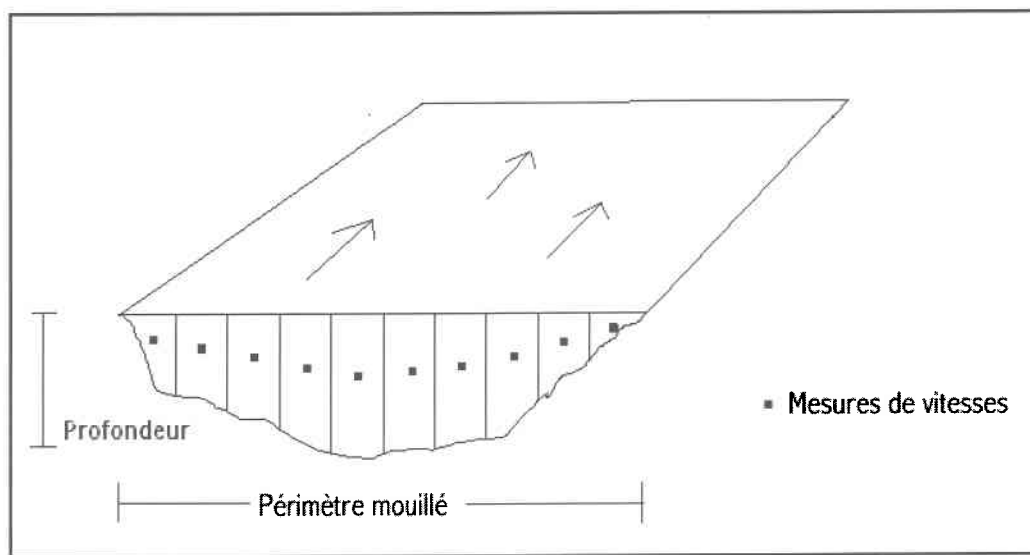


Figure 3.8 :Représentation de la méthode utilisé pour établir les débits s'écoulant dans la rivière.

À l'aide de la courbe de tarage débit-niveau, le débit s'écoulant dans le tronçon est connu à tout moment pour tout l'été en supposant qu'il n'y a pas d'entrée ou de sortie d'eau, sous forme de ruisseau ou autres, entre la section de rivière où la station hydrométrique est disposée et le tronçon choisi pour la présente étude. Cette courbe permet d'obtenir une relation mathématique qui sera utile pour pouvoir simuler la rivière à tous les débits voulus.

De plus, elle permet la simulation de n'importe quels débits, en autant que les niveaux d'eau aux limites du modèle soient connus. Le tableau 3.2 donne l'ensemble des niveaux d'eau mesurés aux extrémités du tronçon étudié ainsi que les débits correspondant obtenus à partir de l'équation présentée dans la figure 3.9.

Tableau 3.1 : Mesures prises pour établir la courbe de tarage débit - niveau de la rivière Sainte-Marguerite.

Niveau mesuré par la station limnimétrique (jauge) (m)	Débit mesuré (m ³ /s)
1,491	2,4
1,579	3,6
1,762	8,0
1,936	13,4
2,065	18,7
2,248	28,9
2,332	31,3
2,489	40,8
2,654	45,3
2,780	56,1

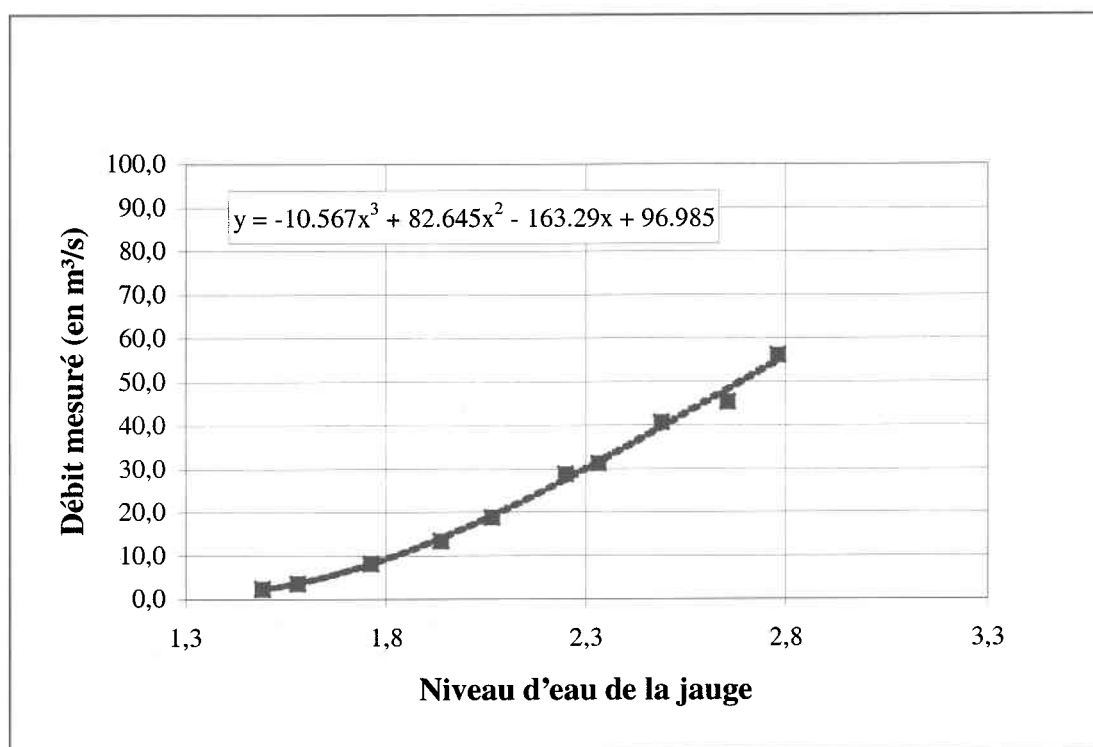


Figure 3.9 : Courbe de tarage de la station limnimétrique implantée sur l'amont du tronçon à l'étude (l'équation représente un ajustement polynomial (courbe) sur les valeurs mesurées).

Tableau 3.2 : Données hydrologiques du tronçon étudié sur la période correspondant à la prise de données abiotiques sur le poisson, s'étendant du 17 juillet au 22 août 1997.

Date	Heure	Niveau amont (m)	Niveau aval (m)	Niveau à la station (m)	Débit (m³/s)
17/07/97	10 :31	0,450	0,350	1,58	3,6
19/07/97	9 :40	0,478	0,365	1,61	4,2
20/07/97	13 :47	0,480	0,370	1,61	4,2
21/07/97	11 :35	0,440	0,335	1,57	3,4
22/07/97	10 :41	0,410	0,315	1,54	2,9
23/07/97	10 :09	0,393	0,295	1,52	2,6
24/07/97	11 :30	0,370	0,280	1,50	2,3

Date	Heure	Niveau amont (m)	Niveau aval (m)	Niveau à la station (m)	Débit (m ³ /s)
25/07/97	9 :49	0,352	0,267	1,48	2,1
26/07/97	9 :57	0,333	0,250	1,46	1,9
27/07/97	10 :42	0,325	0,245	1,46	1,9
28/07/97	9 :59	0,395	0,295	1,52	2,6
29/07/97	10 :09	0,403	0,300	1,53	2,8
30/07/97	10 :24	0,380	0,278	1,50	2,3
01/08/97	11 :40	0,347	0,260	1,48	2,1
02/08/97	10 :47	0,450	0,333	1,59	3,8
03/08/97	13 :51	0,675	0,520	1,80	9,2
04/08/97	11 :52	0,550	0,418	1,67	5,6
05/08/97	11 :52	0,480	0,360	1,60	4,0
06/08/97	12 :15	-	0,323	1,56	3,3
07/08/97	11 :22	0,395	0,295	1,53	2,8
08/08/97	11 :36	0,490	0,370	1,62	4,4
09/08/97	11 :14	0,430	0,320	1,56	3,3
10/08/97	11 :10	0,390	0,290	1,52	2,6
11/08/97	10 :16	0,375	0,280	1,51	2,5
12/08/97	10 :30	0,435	0,328	1,56	3,3
13/08/97	11 :12	0,382	0,288	1,52	2,6
14/08/97	11 :13	0,375	0,278	1,51	2,5
15/08/97	11 :48	0,367	0,270	1,49	2,2
16/08/97	13 :30	0,360	0,268	1,49	2,2
17/08/97	14 :51	0,553	0,420	1,68	5,8
18/08/97	13 :23	0,495	0,374	1,63	4,6
19/08/97	13 :00	0,452	0,340	1,58	3,6
21/08/97	14 :15	0,515	0,390	1,64	4,9
22/08/97	13 :30	0,675	0,500	-	-
22/08/97	17 :00	0,775	0,590	-	-

3.2.6.3 Méthodologie de prise des vitesses

Dans la méthode classique de modélisation des habitats de poisson, des vitesses sont prises un peu partout sur le tronçon et ce, à divers débits, afin de pouvoir calibrer et valider le modèle hydrodynamique par la suite. Dans le cadre de cette recherche, il a été décidé

d'utiliser les vitesses mesurées pour l'évaluation des fréquences d'utilisation des tacons. La méthode utilisée sera donc expliquée à la section 3.2.8.1 portant sur cet aspect.

3.2.7 Caractérisation du substrat

La caractérisation du substrat est une étape importante de la modélisation des habitats des jeunes saumons, car elle a deux rôles à jouer dans la méthodologie. D'abord, le substrat est une des variables abiotiques permettant de décrire le microhabitat choisi par le tacon. Il est donc caractérisé partout où un poisson est observé afin d'obtenir les fréquences d'utilisation de celui-ci par les jeunes saumons. Ensuite, la caractérisation est aussi effectuée à l'échelle du cours d'eau entier pour deux raisons. D'abord, le substrat est un des éléments provoquant la résistance qu'exerce le fond du cours d'eau sur l'écoulement (les macrophytes peuvent aussi jouer ce rôle mais ils étaient absents du cours d'eau étudié), ce qui influence les courants. De plus, cette caractérisation à l'échelle du cours permet d'obtenir les fréquences de disponibilité du substrat qui, lorsque mises en relation avec les fréquences d'utilisation, donnent les préférences d'habitat. Selon le type de substrat présent, certaines sections du cours d'eau seront plus ou moins ralenties. Une bonne caractérisation du substrat devient donc capitale à une simulation hydrodynamique reproduisant le plus fidèlement possible les conditions réelles observées dans la rivière à l'étude.

3.2.7.1 Méthodologie

Cette caractérisation s'est déroulée durant tout l'été parallèlement à la prise de données sur les tacons. Il s'agissait en fait de déterminer la grosseur du substrat présent pour quantifier son influence sur l'écoulement. En parcourant la rivière à gué, une évaluation visuelle du substrat a été faite afin de délimiter les zones où la répartition du substrat (pourcentage de chaque classe de substrat présentes) était assez comparable. Pour évaluer le type de substrat dans chacune des zones, plusieurs méthodes sont proposées dans la bibliographie.

Premièrement, une des méthodes employées par les géomorphologues est celle du d_{16} , d_{50} et d_{84} . Il s'agit d'évaluer pour une certaine étendue autour de l'observateur (disons 1 mètre carré) quelle serait la grosseur de la 16^e, 50^e et 84^e roche si une centaine de roches étaient choisies aléatoirement et placées en ordre de grosseur, de la plus petite à la plus grosse, sur l'étendue. Le d_{50} correspond donc au diamètre médian des éléments sur une surface donnée. Cette information est recueillie visuellement. Afin d'exercer l'oeil de l'observateur, la technique Wolman (1954) a été utilisée.

Une autre méthode a aussi été utilisée afin de faciliter l'inclusion du substrat dans les simulations avec MODELEUR-HYDROSIM. Il s'agit d'abord d'établir des classes de grosseur de substrat de référence (tableau 3.3) (Leclerc *et al.*, 1994) et d'évaluer le pourcentage surfacique de chaque classe présent sur la zone qui a été délimitée.

3.2.7.2 Plan de caractérisation

Sur l'ensemble du tronçon, un total de 145 zones de substrat assez semblables ont été délimitées. Sur chacune de ces zones, l'évaluation visuelle des pourcentages de substrat a été effectuée ainsi que l'évaluation du d_{16} , d_{50} et d_{84} . L'ensemble de ces données se retrouve dans le tableau 1 en annexe. La figure 3.10 montre sous forme d'isosurfaces, la valeur du d_{50} pour l'ensemble du tronçon. Comme on le verra plus loin, la méthode utilisée pour connaître les fréquences d'utilisation du substrat par le poisson est l'évaluation du d_{16} , d_{50} et d_{84} .

Tableau 3.3 : Classes de substrat utilisées pour la cartographie du tronçon.

Type de substrat	Diamètre (m)
Blocs métriques	1.00 et plus
Blocs	0.25 à 1.00
Galets	0.064 à 0.25
Cailloux	0.032 à 0.064
Gravier	0.004 à 0.032
Sable	0.000062 à 0.004

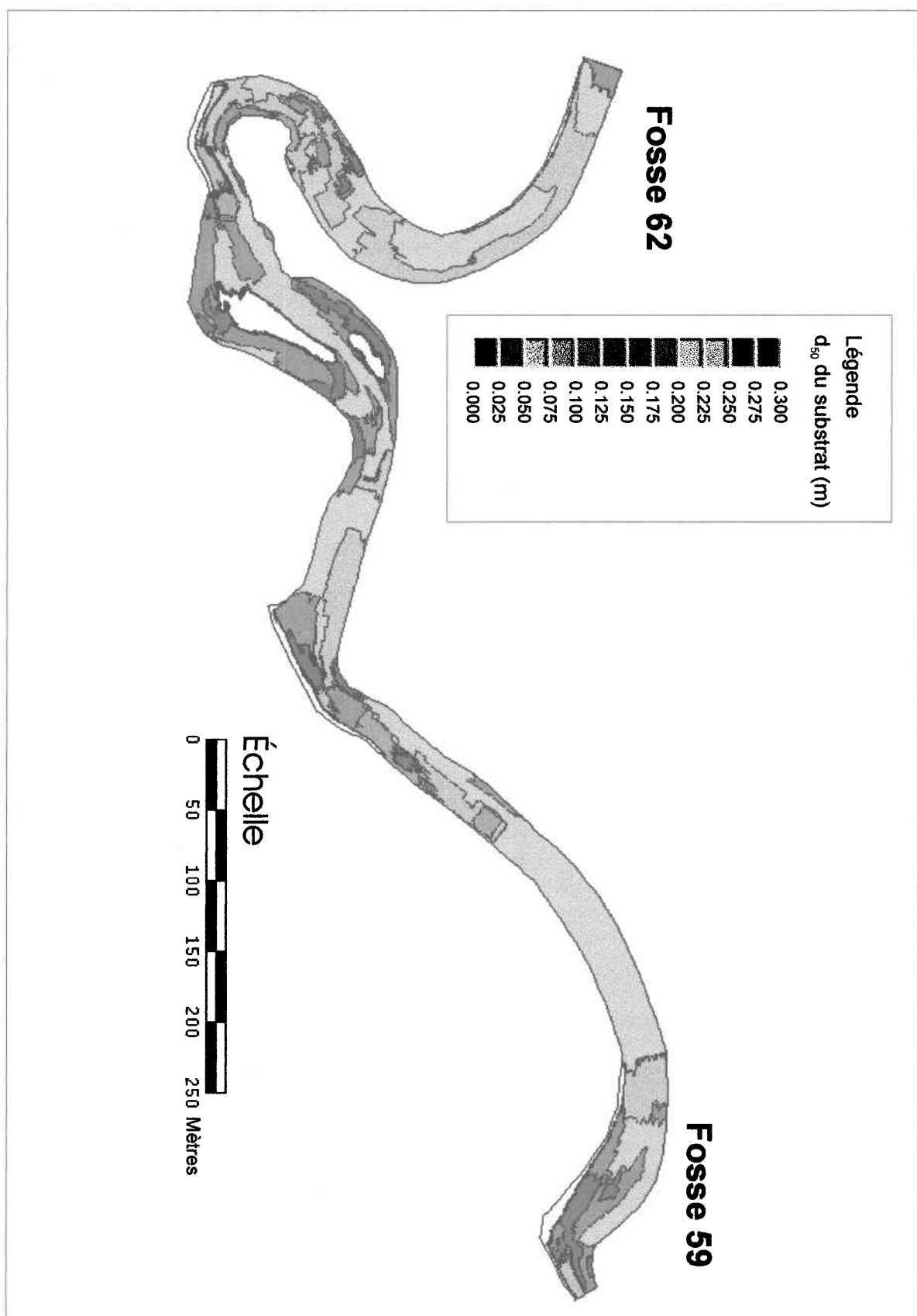


Figure 3.10: Diamètre médian (d_{50}) du substrat sur l'ensemble du tronçon de rivière.

3.2.8 Distribution du tacon dans la rivière

Cette caractérisation s'est déroulée sur une période d'environ 50 jours entre le 17 juillet et le 22 août 1997. Cette activité consiste à détecter visuellement la présence des tacons et à prendre des données abiotiques décrivant leur habitat. Elle se subdivise en deux parties : la première comprend une cueillette de données abiotiques aux endroits où des poissons sont observés, et servant à la détermination des fréquences d'utilisation alors que la deuxième partie consiste en une localisation systématique des poissons et à la cartographie de leur distribution.

Le tronçon a été divisé en trois sections ; les parties amont et aval du site ont servi à produire les données nécessaires à la calibration du modèle de préférences d'habitat (figure 3.11). La partie médiane a été réservée pour des fins de validation de ce modèle. Les activités spécifiques font partie de la recherche conduite par nos collègues de l'Université de Montréal et ne seront pas rapportées ici. Nous nous en tiendrons à la partie pertinente aux mesures abiotiques et à leur utilisation dans la mise en oeuvre du modèle hydrodynamique.

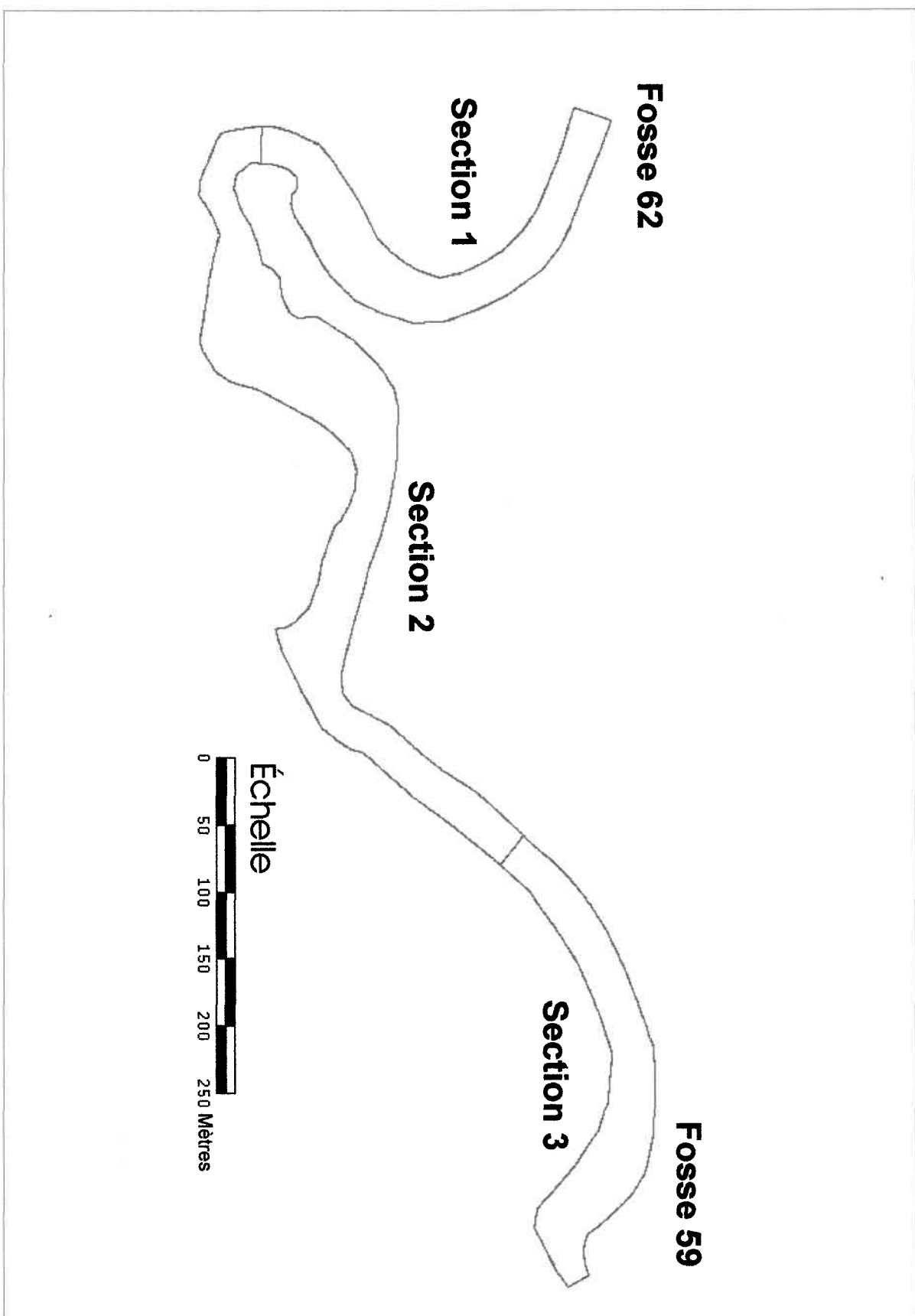


Figure 3.11: Délimitation des trois sections de rivière pour la cueillette des données de calibration et de validation.

3.2.8.1 Mesures des vitesses pour déterminer les fréquences d'habitat

Pour connaître les préférences d'habitat du jeune saumon, il est d'abord nécessaire d'en repérer le plus possible dans le tronçon à l'étude. Pour ce faire, on sillonne le cours d'eau de l'aval vers l'amont afin de ne pas être repéré à l'avance par les tacons. L'observation s'effectue en apnée. Aux endroits où un tacon est détecté, un marqueur (pierre colorée) y est déposé et par la suite, on localise le poisson à l'aide de la station totale. À ce même endroit, on mesure la profondeur d'eau, l'ensablement, le degré de végétation, la vitesse moyenne du courant et on y évalue visuellement le substrat avec la technique du d_{16} , d_{50} et d_{84} . La mesure de la profondeur est effectuée à l'aide d'une tige graduée que l'on appuie au fond. La vitesse du courant était prise à 6/10 (0,6H) de la profondeur (en partant de la surface) réputé procurer la vitesse moyenne de la colonne d'eau (Nestler, 1989) quand le profil de vitesse est de type logarithmique. Ces vitesses étaient prises à l'aide d'un courantomètre de type Price standard (moulinet). La précision de ce courantomètre est variable et dépend des conditions rencontrées sur le terrain et d'une manipulation minutieuse de l'opérateur. Dans un écoulement uniforme de laboratoire, l'incertitude de l'appareil est inférieure à 0,01 m/s sur des mesures de plus de 0,10 m/s. La plupart des mesures de vitesses ont été effectuées pendant une période minimale d'une minute afin d'obtenir une valeur moyenne exempte des fluctuations de courte période (turbulence). En plus de servir à établir les conditions d'utilisation du milieu par le tacon, ces vitesses sont utilisées pour valider le modèle hydrodynamique.

À tous les jours, les relevés biotiques et abiotiques débutaient où ils avaient été arrêtés la veille de façon à couvrir les deux sections de calibration des courbes de préférences en environ une à deux semaines. Cette mesure étant indépendante du débit, on procédait ensuite à la localisation systématique des poissons à l'aide de la station totale. La rivière (section centrale) était parcourue et tous les poissons rencontrés étaient répertoriés et localisés à l'aide de la station totale. Les tacons étaient âgés de 0 à 2-3 ans. Cependant, la

différenciation des âges étant difficile sous l'eau, seul les tacons 1+ et 2+ ont été retenus pour la suite. Le tronçon a été parcouru au complet de cette façon à deux reprises dans la période mentionnée auparavant et un ensemble de données de 309 poissons d'âge 1+ et 2+ ont été rendues disponibles pour la création des courbes de préférences (voir l'ensemble des données dans les tableaux 2 et 3 en annexe) et 256 tacons ont été localisés dans la deuxième section de la rivière afin de valider le modèle par la suite.

4. MODÈLE DE TERRAIN ET SIMULATIONS HYDRODYNAMIQUES

4.1 Création du modèle numérique de terrain

Pour créer un modèle hydrodynamique, on doit d'abord incorporer les données de terrain dans la base de données du modèle. Pour ce faire, on utilise le logiciel MODELEUR (Secretan et Leclerc, 1998) pour traiter les données de terrain et construire le maillage hydrodynamique qui servira à créer le modèle numérique de terrain (MNT) ainsi qu'à la visualisation des résultats. Lorsque les données brutes de topographie sont importées dans le logiciel, MODELEUR crée une triangulation de Delaunay reliant chacun des points de données. Ce maillage de type éléments finis permet une interpolation des données de terrain qui seront ensuite assignées aux noeuds-sommets du maillage hydrodynamique lesquels ne recoupent pas directement les points de mesure. De même, le substrat mesuré sur le terrain sera introduit dans MODELEUR et convertit en coefficients de frottement de Manning. Le maillage hydrodynamique est constitué d'éléments finis triangulaires (voir figure 2.2) et c'est sur celui-ci que seront effectuées les simulations. Les éléments finis utilisés afin de mieux représenter la variabilité topographique du cours d'eau sont allongés longitudinalement dans le sens de l'écoulement puisque dans un cours d'eau de largeur aussi faible, la variation de la topographie est plus importante transversalement (berges et talweg) que longitudinalement. La topographie varie généralement en pente plus douce dans le sens de l'écoulement d'où l'utilisation de mailles allongées. De cette façon, le maillage du MNT capte la variation morphologique transversale tout en nécessitant un nombre d'éléments finis moins important, ce qui facilite ensuite la simulation hydrodynamique puisque le nombre d'inconnues est moins élevé.

Ici, le maillage de Delaunay est constitué de 9399 noeuds (correspondant à l'ensemble des données de topographie recueillies sur le terrain) ce qui donne un ensemble de 18743 éléments tandis que le maillage du MNT possède 11186 noeuds avec un nombre d'éléments plus restreint (étant donné que chaque élément fini possède six noeuds) soit 5423 (voir figure 4.1) pour un total de 25213 degrés de liberté à résoudre (inconnues).

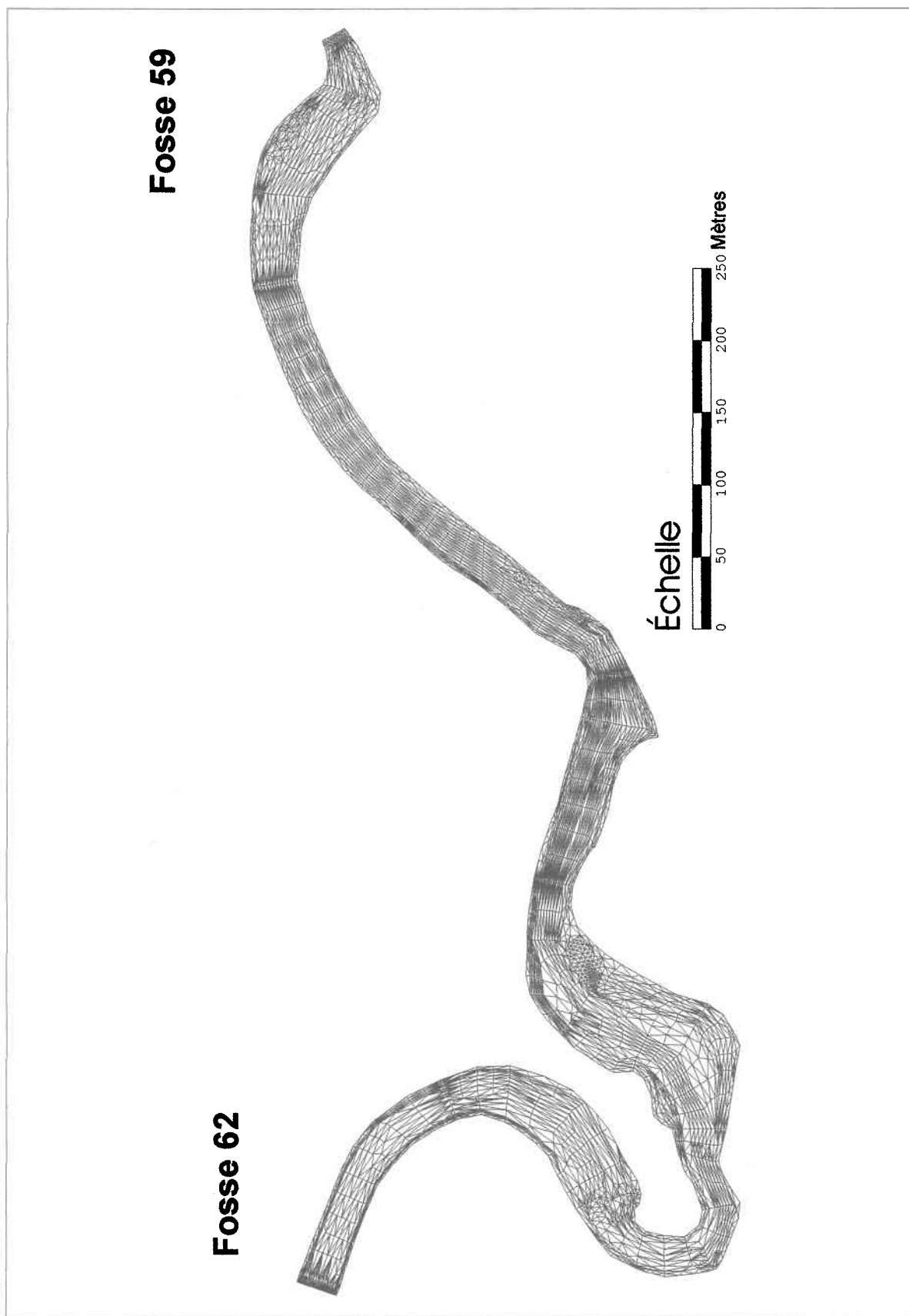


Figure 4.1: Maillage hydrodynamique constitué de 11186 noeuds servant à créer le MNT.

4.2 Conditions aux limites, calibration et validation

Comme mentionné auparavant, il y a deux méthodes servant à injecter les conditions aux limites dans HABIOSIM. La première est celle du débit - niveau, le débit étant donné en amont et le niveau à l'aval. La deuxième consiste à introduire des conditions niveau - niveau en amont et en aval. Dans le premier cas, le modèle ajuste les vitesses au débit de façon à recouper le niveau imposé à la sortie tandis que dans le deuxième cas, le modèle part d'une ligne d'énergie (pente de la surface libre) pour résoudre l'écoulement en débit et en vitesse. Cette deuxième méthode requiert cependant un peu plus d'ajustement des paramètres de viscosité de façon à obtenir des vitesses qui, lorsqu'intégrées sur la surface mouillée d'un transect du cours d'eau, donneront sensiblement le débit s'écoulant dans la rivière pour les niveaux d'eau imposés.

Pour le premier essai de calibration, les conditions aux limites furent du type niveau - niveau. Comme nous l'avons déjà mentionné, pour évaluer le résultat, des vitesses et des niveaux d'eau mesurés correspondant aux conditions d'utilisation par des poissons ont été utilisés. Ces données sont disponibles pour toutes les journées du programme d'observation des poissons soit, pour toutes les dates contenues dans les tableaux 2 et 3 en annexe. Les valeurs abiotiques mesurées pour un certain débit ne couvrent cependant pas l'ensemble du domaine simulé puisque celles-ci correspondent aux données recueillies pendant une journée, sur la zone où l'on travaillait à ce moment. Pour la simulation de calibration, on n'avait pas de points de données partout sur l'ensemble du tronçon mais, on en avait plusieurs sur une certaine section de celui-ci. La comparaison des résultats de simulation avec les mesures a tout de même permis de procéder à un ajustement de la simulation.

Les simulations de validation quant à elles, doivent permettre de bien valider la reproduction des vitesses par le logiciel pour d'autres zones du tronçon où on travaillait lorsque ces débits se sont produits dans la rivière.

L'étape de calibration consiste à ajuster certains paramètres de rugosité et de viscosité turbulente à l'intérieur d'HYDROSIM. Les coefficients de rugosité correspondent aux « n » de Manning alors que la viscosité est décrite par un coefficient obtenu avec la méthode de la « longueur de mélange ». Dans le cas présent, les paramètres de rugosité n'ont pas vraiment été touchés puisque ceux-ci sont déjà quantifiés à partir des valeurs de substrats incorporées au MNT dans le MODELEUR. L'équation 4.1 (Morin et *al.*, 1999) est celle utilisée par HYDROSIM pour convertir les valeurs du substrat.

$$\frac{1}{n} = 34,9 * (-\log(\bar{d}'))^{0,31} + 0,0017 \quad (4.1)$$

où,

n = coefficient de Manning

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

On peut calculer le diamètre moyen à partir de l'équation suivante :

$$\bar{d}' = \sum_{i=1}^P w_i d_i \quad (4.2)$$

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

Le paramètre le plus déterminant pour faire converger la simulation hydrodynamique et ajuster les niveaux d'eau a été la viscosité turbulente. Celle-ci est reliée à la taille des éléments et elle est dépendante de la profondeur et du gradient de vitesses. Les débits que l'on a utilisé pour la calibration et la validation sont présentés dans le tableau 4.1 et les données mesurées et simulées ainsi que les écarts calculés correspondant à ceux-ci se retrouvent dans les tableaux 4, 5 et 6 en annexe. La figure 4.2 représente la localisation des points de mesure pour ces mêmes débits.

Tableau 4.1 : Débits simulés pour calibrer et valider les simulations hydrodynamiques.

	Débit (m³/s)		
	2,6 (débit de calibration)	3,3 (validation)	5,6 (validation)
Niveau en amont (m)	98,048	98,085	98,205
Niveau en aval (m)	93,961	93,986	94,084
Dates des observations	23 juillet 1997 28 juillet 1997 10 août 1997 13 août 1997	6 août 1997 9 août 1997	4 août 1997

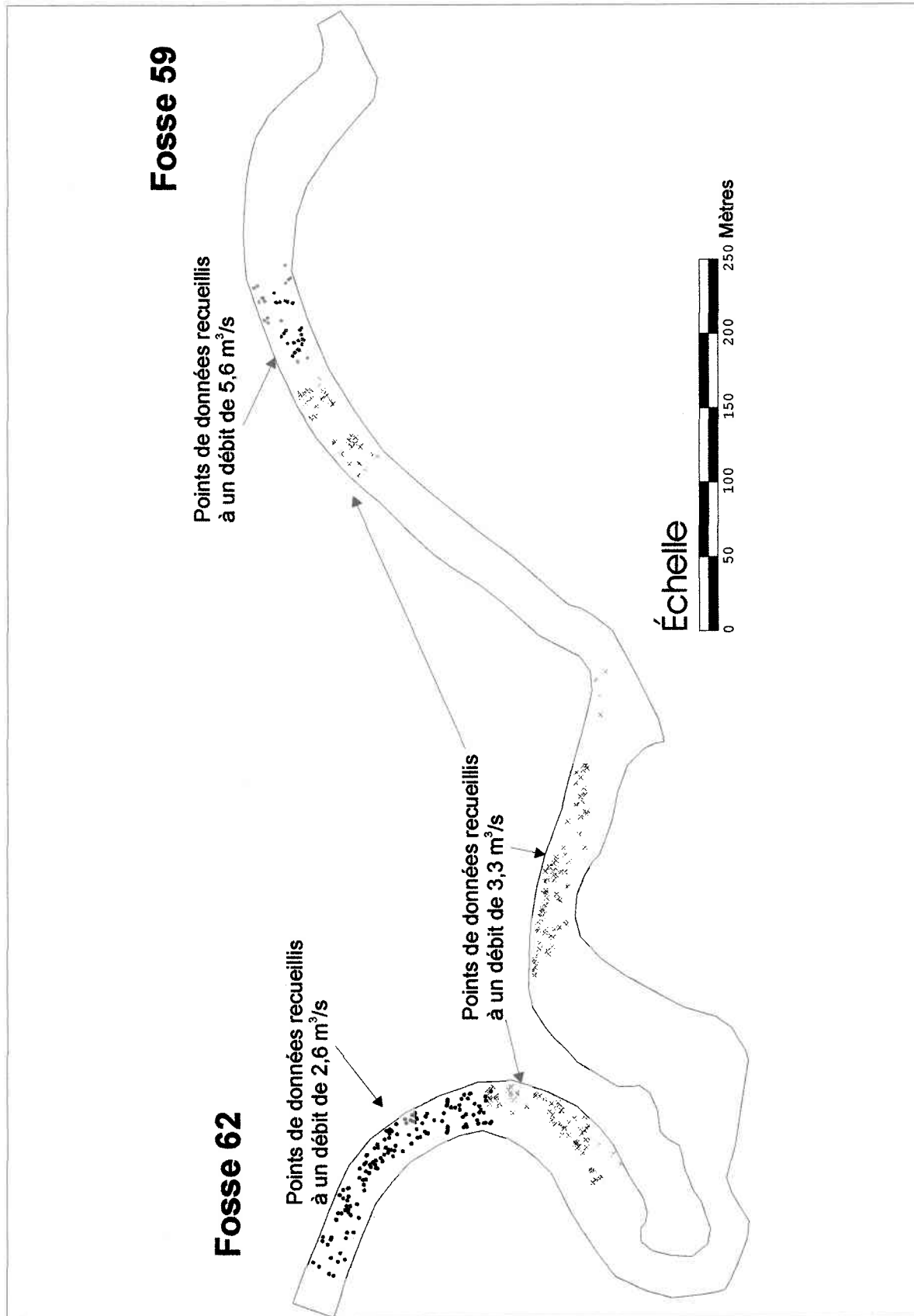


Figure 4.2: Localisation des points où les poissons ont été observés aux débits de 2,6, 3,3 et 5,6 m³/s et où des données physiques ont été récoltées.

4.3 Analyse préliminaire des premiers résultats de calibration

L'analyse préliminaire des simulations consiste à vérifier l'exactitude des valeurs simulées en fonction des valeurs mesurées sur la rivière (voir les graphes 4.3 à 4.8). Cette analyse a permis de voir que les profondeurs simulées sont satisfaisantes. Toutefois, la représentativité des vitesses simulées n'est pas homogène sur tout le tronçon simulé, c'est-à-dire, les écarts résiduels (Écart = Vitesse mesurée - Vitesse simulée) entre les valeurs simulées et mesurées pour certaines zones du modèle de terrain sont trop grands.

4.3.1 Simulations de base à 2,6 m³/s

La première tentative de simulation effectuée à un débit de 2,6 m³/s a donné un écart moyen de 7,8 cm sur la profondeur soit un écart relatif de 19% (comprenant des profondeurs simulées pouvant être supérieures ou inférieures aux valeurs mesurées).

Pour les vitesses simulées, si on élimine celles qui ont moins de 0,05 m/s, l'écart moyen tombe à 0,09 m/s pour un écart moyen relatif de 43% alors que lorsque l'on élimine les vitesses plus faibles que 0,10 m/s, on obtient toujours un écart moyen de 0,09 m/s avec cette fois-ci un écart moyen relatif de 35% (les vitesses faibles sont éliminées pour prendre en compte la non fiabilité de l'instrument de mesure à ces valeurs).

Afin de vérifier si une augmentation du débit allait améliorer les résultats, les simulations de validation ont aussi été effectuées avec la même paramétrisation. Les résultats pour la profondeur ont donné un écart moyen de 8,4 cm et de 5,1 cm respectivement pour les débits de 3,3 m³/s et 5,6 m³/s avec un écart moyen relatif de 30% et de 14% pour la profondeur. Pour les vitesses, au débit de 3,3 m³/s, et en éliminant les vitesses plus faibles de 0,10 m/s,

l'écart moyen demeure à environ 0,19 m/s mais l'écart moyen relatif est maintenant de 51%. De même pour le débit de 5,6 m³/s, l'écart moyen est de 0,17 m/s pour un écart moyen relatif de 51% encore une fois, avec aucune vitesse en deçà de 0,10 m/s.

Le manque de discrétisation du maillage hydrodynamique est une des explications envisagées pour expliquer ces écarts importants. Celui-ci pourrait entraîner un lissage des valeurs de vitesses simulées par rapport aux vitesses réelles. Il est possible par exemple, que dans certaines zones de la rivière (notamment près des berges), les profondeurs simulées s'éloignent quelque peu des profondeurs réelles, provoquant ainsi le calcul d'une vitesse inexacte. Une meilleure discrétisation pourrait peut-être résoudre ce problème.

Une autre explication possible est la paramétrisation du frottement. À l'intérieur de modeleur, une équation transforme le substrat observé en coefficient de frottement. Il existe plusieurs méthodes pour calculer le « n » de Manning. Bray (1970) mentionne que l'on doit tenir compte de la profondeur d'eau lors du calcul de ce coefficient alors que d'autres auteurs négligent complètement ce paramètre. Actuellement, la profondeur n'est pas prise en compte lors du calcul du coefficient de frottement à l'intérieur du modèle hydrodynamique. Il est toutefois possible qu'à de faibles profondeurs comme celle observée dans la rivière Sainte-Marguerite, il soit important d'en tenir compte. Une alternative à la paramétrisation du frottement a donc été explorée.

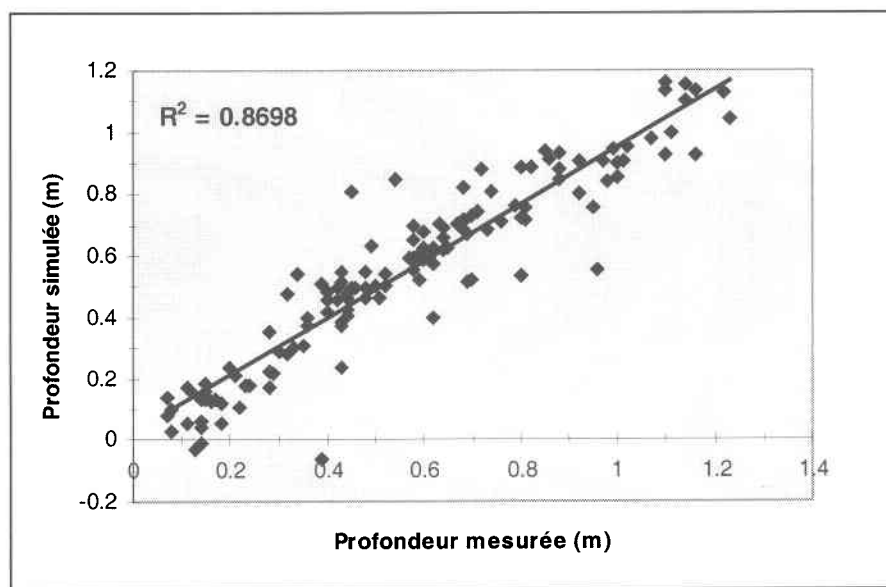


Figure 4.3 :Profondeurs simulées à l'aide d'HYDROSIM en fonction des profondeurs mesurées en certains points de la rivière pour un débit de $2,6 \text{ m}^3/\text{s}$

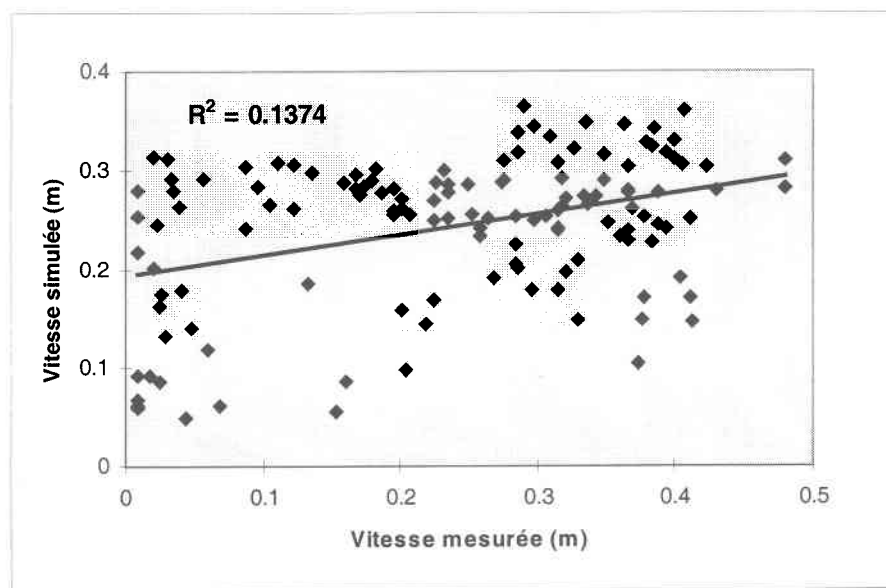


Figure 4.4 :Vitesses simulées à l'aide d'HYDROSIM en fonction des vitesses mesurées en certains points de la rivière pour un débit de $2,6 \text{ m}^3/\text{s}$

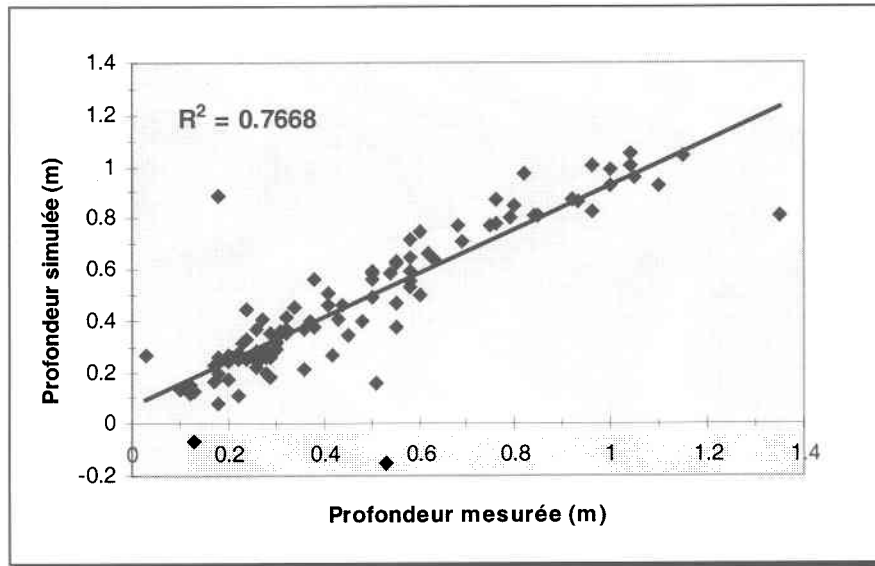


Figure 4.5 :Profondeurs simulées à l'aide d'HYDROSIM en fonction des profondeurs mesurées en certains points de la rivière pour un débit de 3,3 m³/s

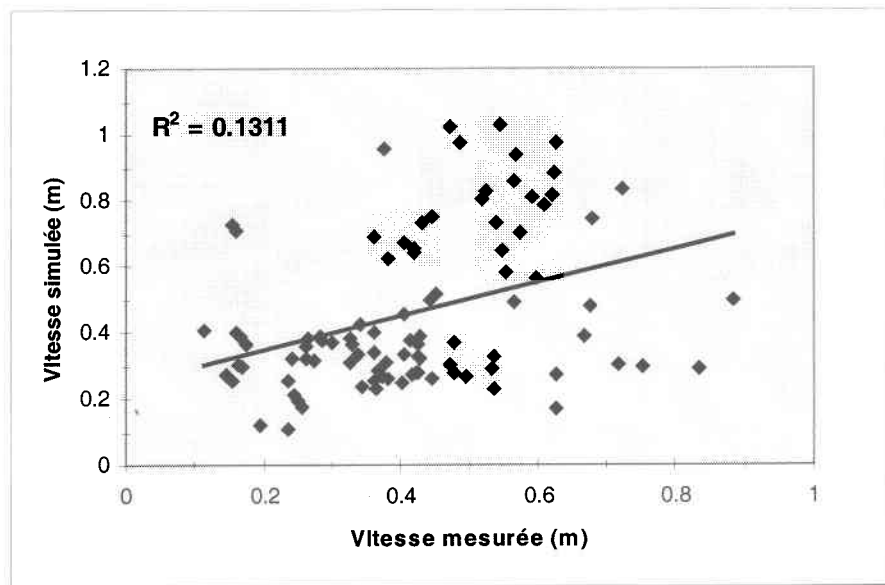


Figure 4.6 :Vitesses simulées à l'aide d'HYDROSIM en fonction des vitesses mesurées en certains points de la rivière pour un débit de 3,3 m³/s

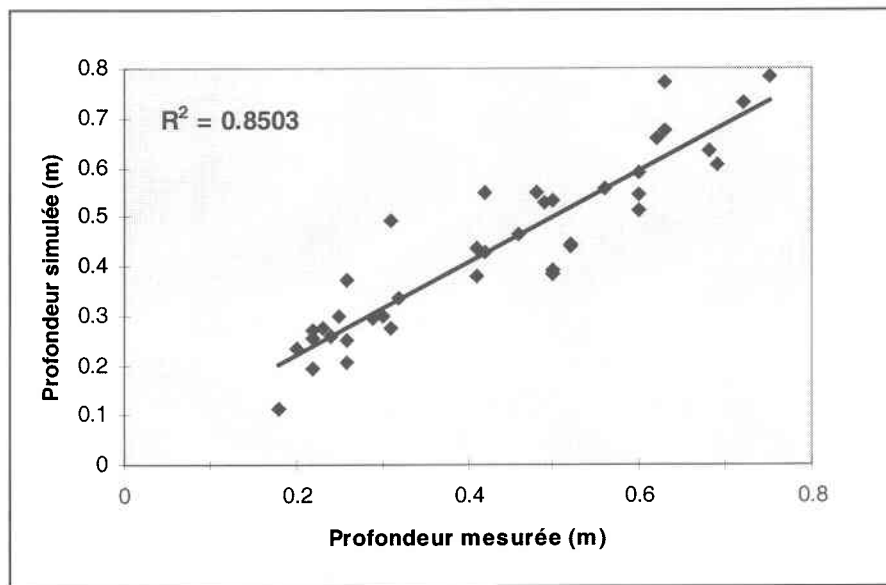


Figure 4.7 : Profondeurs simulées à l'aide d'HYDROSIM en fonction des profondeurs mesurées en certains points de la rivière pour un débit de $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$

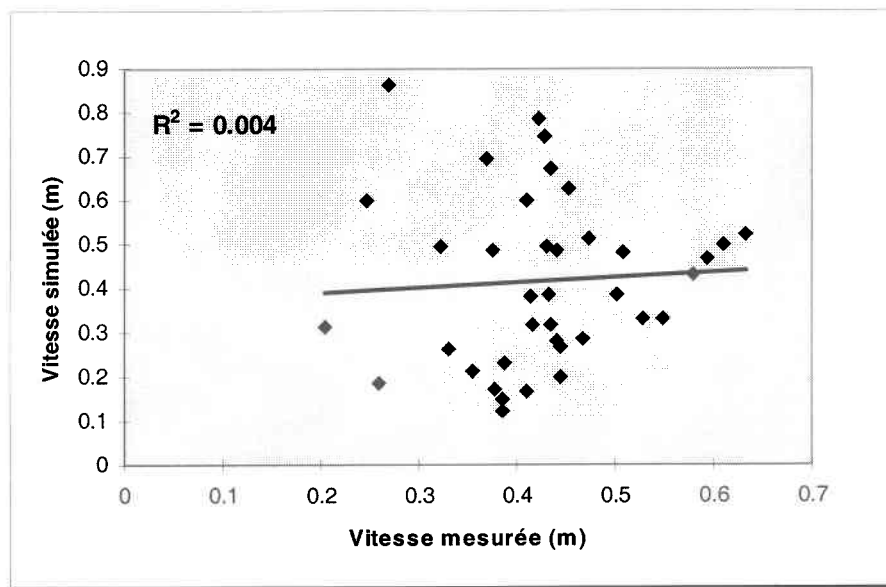


Figure 4.8 : Vitesses simulées à l'aide d'HYDROSIM en fonction des vitesses mesurées en certains points de la rivière pour un débit de $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$

Finalement, il est aussi possible que la décision de ne prendre que des vitesses ayant été

mesurées aux sites d'observation d'un tacon, comme vitesses de calibration et de validation, soit un choix inadéquat. De plus amples explications seront données plus loin sur ce point. De plus, le fait de ne mesurer la vitesse qu'à une profondeur de $0,6H$ peut aussi s'avérer insuffisante.

4.4 Tentative de diminution des écarts entre les valeurs simulées et mesurées pour les vitesses

4.4.1 Ajustement du modèle par la discrétisation

Une des avenues explorées afin de tenter d'améliorer les résultats de la simulation a été d'améliorer le modèle numérique de terrain en augmentant la densité du maillage hydrodynamique. Ceci implique un raffinement du maillage pour une meilleure représentation de la topographie et conséquemment, une meilleure précision des calculs hydrodynamique. De cette façon, les profondeurs simulées sont plus précises ce qui doit entraîner une amélioration des vitesses simulées. Il existe toutefois une limite à cette représentativité du modèle de terrain ; elle se trouve justement dans la densité des points de mesure de la topographie. En supposant que celles-ci ont été faites en tenant compte de la linéarité des changements morphologiques entre les points, une interpolation entre ceux-ci demeure valide jusqu'à un certain point qui autorise le modèle numérique de terrain à comporter plus de noeuds que l'ensemble des points de mesure.

Pour ce faire, deux tests ont été effectués. D'abord, le maillage du tronçon de rivière en entier a été modifié et raffiné. Le nombre d'éléments finis a été augmenté de 5423 à 26542, ce qui donne 54389 noeuds (voir figure 4.9) et 122676 inconnues à résoudre. Les calculs nécessaires aux simulations étant considérables, seul le débit de $2,6 \text{ m}^3/\text{s}$ a été simulé pour vérifier l'efficacité de l'approche.

Le deuxième test effectué impliquait de raffiner seulement une partie du tronçon à l'étude soit celle correspondant aux zones de mesure des vitesses pour le débit de $2,6 \text{ m}^3/\text{s}$. En ne simulant ainsi qu'une partie de la rivière, il était alors possible d'utiliser une densité d'éléments finis encore plus grande sur une certaine surface pour un nombre total de noeuds moindre que pour le tronçon en entier. Le nouveau maillage hydrodynamique obtenu se composait de 19622 éléments (voir figure 4.10), 40013 noeuds et 90127 inconnues à résoudre.

4.4.2 Résultats des simulations avec changement de discrétisation

4.4.2.1 Maillage alternatif sur le domaine entier

Malgré ce nouveau maillage beaucoup plus dense que le premier en nombre d'éléments finis, on obtient tout de même un écart moyen des profondeurs de 5,4 cm pour le débit de $2,6 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui donne un écart moyen relatif de 17% alors qu'on obtenait respectivement 7,8 cm et 19% auparavant. Cette amélioration démontre le rôle d'un modèle de terrain de meilleure qualité dans le calcul des profondeurs. Encore une fois, l'ensemble des faibles profondeurs dû au faible débit, gonfle l'erreur relative de façon importante.

Pour ce qui est des vitesses, l'écart moyen entre les valeurs mesurées et calculées est de 0,1 m/s pour un écart moyen relatif de 37% lorsque les faibles vitesses ($<0,10 \text{ m/s}$) sont éliminées du calcul. On n'obtient donc pas d'amélioration en procédant ainsi.

4.4.2.2 Maillage alternatif du sous-domaine amont

En utilisant le maillage encore plus dense créé pour le début du tronçon (19622 éléments pour 40013 noeuds et 90127 inconnues), on obtient un écart moyen de 4,2 cm sur les profondeurs pour une erreur relative de 11% pour la simulation à $2,6 \text{ m}^3/\text{s}$. Idéalement, il aurait fallu que le niveau d'eau simulé soit de un ou deux centimètres plus bas mais cela est

assez difficile à obtenir car on est à la limite de l'erreur produite sur les niveaux d'eau par le logiciel. Lorsque les profondeurs ont en moyenne plus de 1 m de profondeur, cette erreur est acceptable mais lorsque la moyenne des profondeurs est entre 50 et 60 cm, une erreur de quelques centimètres devient importante. Il semble donc qu'il serait difficile d'obtenir une erreur plus faible que 10% même si le maillage était de nouveau raffiné car, on ne peut pas dépasser la précision du maillage de Delaunay des points pris sur le terrain.

Si on considère les écarts au niveau des vitesses ($>0,10$ m/s), on obtient un écart moyen de 0,098 m/s pour une erreur relative de 34%. Encore ici, malgré une discrétisation encore plus fine, le gain de précision demeure marginal et probablement non significatif.

4.4.2.3 Discussion

Il est donc possible d'améliorer les profondeurs simulées en augmentant la densité d'éléments finis du MNT. Toutefois, on ne pourra jamais atteindre une précision supérieure que ce que les données prises sur le terrain permettent en supposant que le niveau d'eau est bien simulé et ajusté. Cependant, il semble difficile d'apporter une amélioration significative aux vitesses simulées par raffinement du maillage. L'utilisation des données actuelles obtenues par simulation pourrait insérer un biais dans la détermination des indices de préférences.

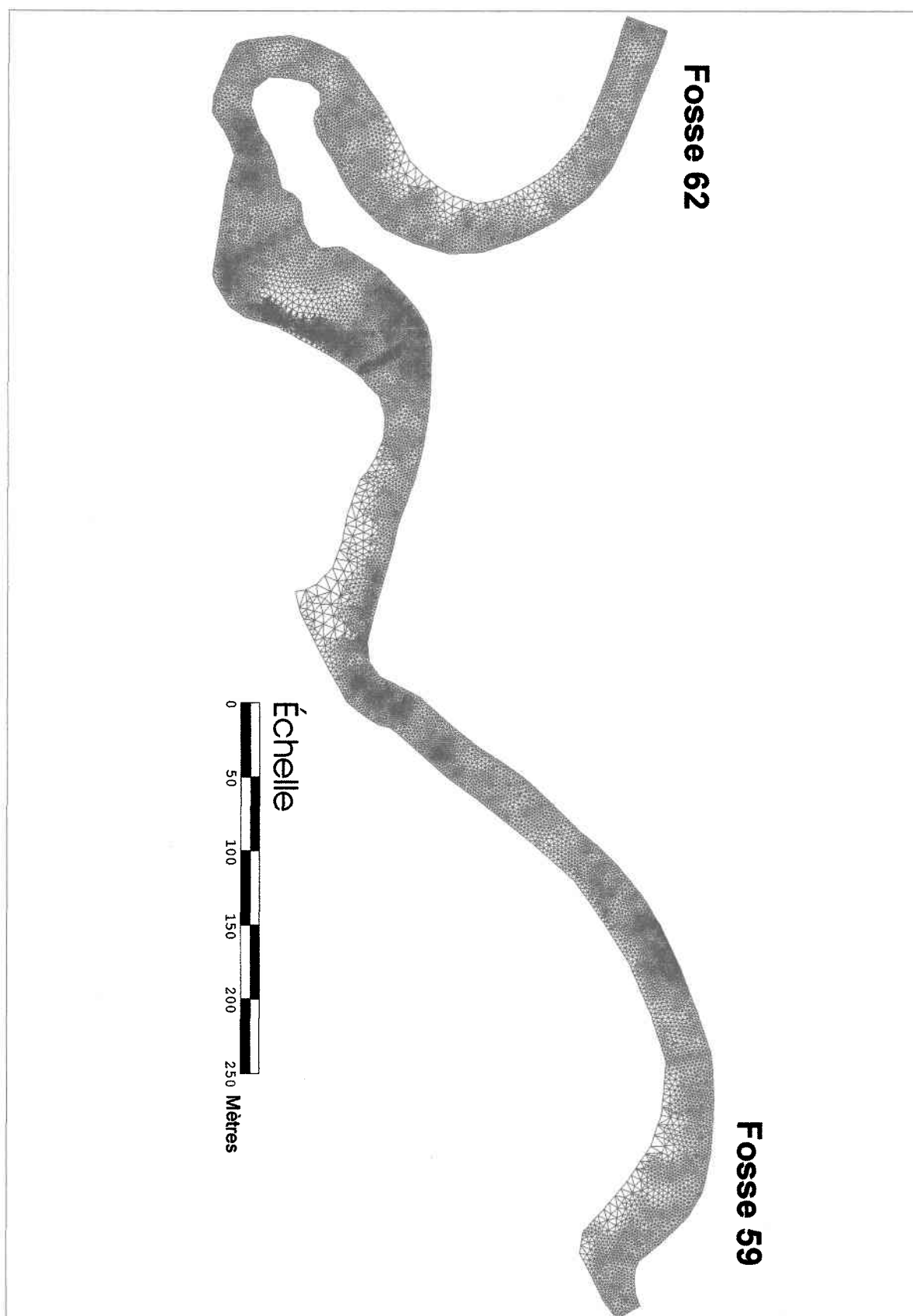


Figure 4.9: Maillage hydrodynamique pour tout le tronçon de rivière, contenant 54389 noeuds.

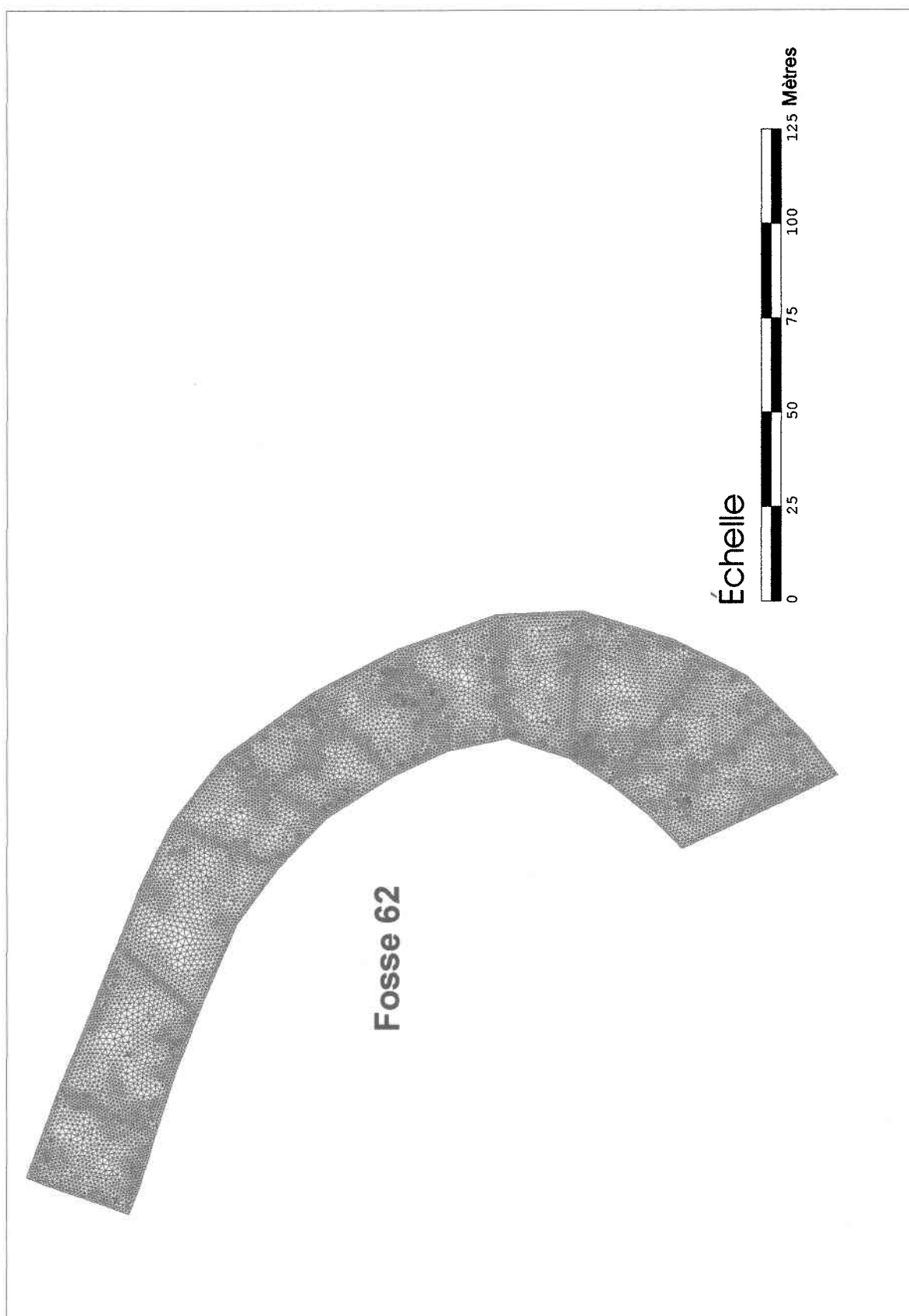


Figure 4.10: Maillage hydrodynamique pour le début du tronçon contenant 40013 noeuds.

4.4.3 Alternative à la paramétrisation du frottement

Pour pouvoir utiliser les données obtenues par simulation lors du calcul des indices de préférences, il faut que les écarts entre les valeurs mesurées et simulées soient acceptables (généralement inférieurs à 10%). Pour les profondeurs d'eau, il a été possible par raffinement du maillage d'obtenir des valeurs calculées très rapprochées des valeurs mesurées. Ce ne fut cependant pas le cas pour les vitesses. Si on observe les écarts entre les vitesses mesurées et simulées en fonction des vitesses mesurées sur le terrain, on obtient la figure suivante :

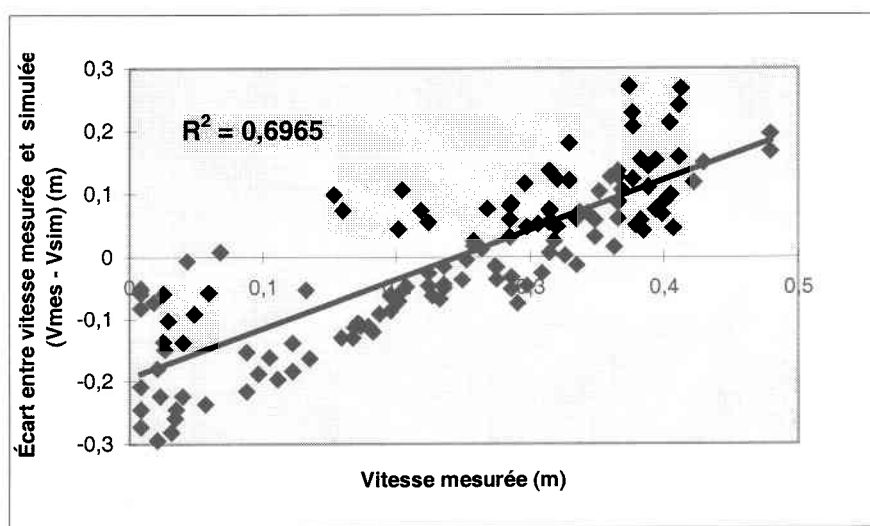


Figure 4.11 : Graphe représentant les écarts entre les vitesses mesurées et les vitesses simulées en fonction des vitesses mesurées en certains points de la rivière pour un débit de $2,6 \text{ m}^3/\text{s}$.

Ce type de figure peut être expliqué de deux façons possibles. À prime abord, l'allure du graphique peut laisser croire qu'il existe un biais systématique entre les vitesses simulées et mesurées. Cependant, il faut faire très attention à la façon d'interpréter ce résultat. Par exemple, si l'on prend une gamme de valeur, représentant les vitesses mesurées, (par

exemple, des valeurs de 0 à 20) et que l'on assigne à chacune de ces valeurs, des nombres aléatoires, représentant les vitesses simulées, contenus dans la même gamme (ici, cinq valeurs aléatoires ont été générées à chacune des valeurs de 0 à 20), le tracé de la différence (écart) entre les deux nombres sera très similaire au graphique précédent (voir figure 4.12). Ceci s'explique par le fait que plus le nombre est faible (près de 1), plus il y a de chance que les valeurs aléatoires assignées à ce nombre soit supérieures à celle-ci d'où une différence qui aura une tendance à s'éloigner de la droite de différence zéro. De même, si l'on assigne des nombres aléatoires à la valeur 20, la tendance sera à ce que les valeurs soient inférieures à celle-ci. La figure démontre donc la possibilité que les vitesses simulées aient un certain caractère aléatoire ce qui démontrerait un problème au niveau de la simulation.

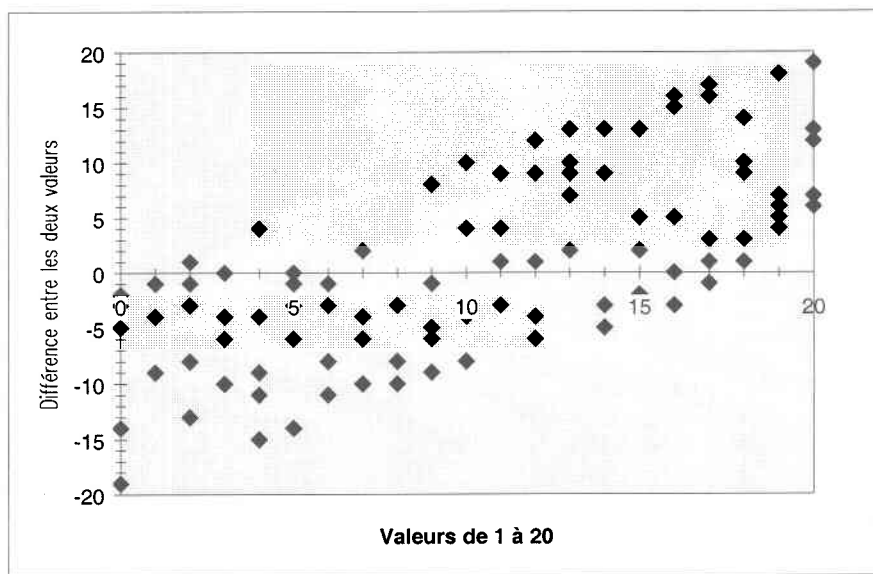


Figure 4.12 : Graphe représentant les écarts entre des valeurs aléatoires (5) situées entre 0 et 20 assignées à des valeurs de 0 à 20.

Si on observe à nouveau la figure 4.11, on remarque aussi que les points se regroupent plus dans certaines zones que dans d'autres. Il y aurait donc un facteur supplémentaire expliquant l'allure des points obtenue. La deuxième possibilité d'explication de ce type de

résultat est qu'il existe effectivement un biais réel dans le rapport entre les résultats de simulation et les mesures. Il est possible en effet que la gamme des vitesses simulées soit réduite par rapport à celle des vitesses mesurées. En atténuant les gradients, la modélisation hydrodynamique produit des vitesses qui ont tendance à être plus homogènes (lissées) que celles mesurées sur le terrain. Cette observation sera discutée en plus amples détails plus loin, mais on peut d'ores et déjà mentionner que cela est peut-être dû au lissage de la topographie par interpolation entre les points et au substrat qui n'est pas réellement simulé mais plutôt remplacé par un paramètre de frottement (« n » de Manning). Ce dernier paramètre est calculé à l'intérieur du logiciel sans tenir compte de la profondeur d'eau. Selon Bray (1970), il serait important de tenir compte de la profondeur dans le calcul de la résistance à l'écoulement dans les cours d'eau où les profondeurs d'eau sont moins importantes. Il est possible qu'aux faibles profondeurs d'eau, le substrat exerce une plus grande influence sur la colonne d'eau ce qui aurait pour effet de ralentir un peu plus l'écoulement. Les vitesses mesurées seraient alors plus basses que celles simulées par le logiciel. Le substrat peut même introduire une hétérogénéité supplémentaire puisqu'il crée des zones entre les roches où le courant peut être accéléré ou ralenti. Dans certaines situations, des remous et même des contre-courants peuvent apparaître et malheureusement, ceux-ci ne sont pas reproduits par le modèle. Toutefois, lorsque les profondeurs sont plus importantes, l'influence du substrat (hauteur) devient de plus en plus faible relativement à la profondeur totale ce qui donnerait des vitesses mesurées plus rapides que ce que le logiciel peut calculer d'où l'apparition d'un biais dans la figure 4.11.

L'équation 4.1 représente la formule de conversion du substrat en « n » de Manning à l'intérieur du logiciel MODELEUR. Le seul paramètre nécessaire à cette équation est une dimension représentant la granulométrie (pouvant être le d_{50} du substrat). On a donc fait l'hypothèse qu'il est possible qu'avec des coefficients de Manning dépendant de la profondeur, les vitesses simulées se rapprocheraient de celles mesurées sur le terrain.

Prenons l'équation de Manning :

$$v = \frac{1}{n} H^{2/3} S^{1/2} \quad \text{ou } vn = cte \quad (4.3)$$

avec,

H = profondeur totale

n = coefficient de Manning

S = pente générale du lit de la rivière et de la ligne d'eau

v = vitesse

En un point de la rivière, à un débit, une profondeur et une pente donnée, on peut affirmer que la vitesse multipliée par le coefficient de Manning doit demeurer constant. On peut donc utiliser l'expression 4.4 pour déterminer les coefficients de Manning que l'on devrait avoir dans le cours d'eau pour que les vitesses simulées soient identiques aux vitesses mesurées :

$$v_1 n_1 = v_2 n_2 \quad (4.4)$$

ou

$$n_2 = \frac{v_1 n_1}{v_2}$$

où,

v_1 = vitesse simulée

n_1 = coefficient de Manning implanté dans le MODELEUR (équation 2.14 et 4.1)

v_2 = vitesse mesurée

n_2 = coefficient de Manning calculé

En utilisant les ensembles de données des tableaux 1, 2 et 3 en annexe, il a été possible de déterminer pour chaque point où un poisson a été observé aux débits de 2,6 et 3,3 m³/s, les valeurs de vitesse mesurées, simulées, du coefficient de Manning provenant du d_{50} converti dans MODELEUR ainsi que la profondeur simulée. En utilisant l'équation 4.4, de nouveaux coefficients de Manning ont été calculés pour ces divers points et une relation (« n » de Manning théorique) a été ajusté à ceux-ci afin d'être implantée dans le modèle numérique en vue d'améliorer la conversion des d_{50} en « n » de Manning. Les calculs permettant l'obtention de cette relation sont expliqués plus loin. La figure 4.13, montre la relation entre ces nouveaux coefficients de Manning calculés et les profondeurs correspondantes (◆).

On remarque d'abord qu'aux faibles profondeurs, il semble évident qu'un coefficient de Manning plus élevé serait nécessaire pour que les vitesses simulées à l'aide d'HYDROSIM correspondent aux vitesses mesurées sur le terrain tandis qu'aux profondeurs plus élevées, le coefficient semble devenir indépendant de la profondeur. La relation mathématique pour calculer le coefficient de Manning utilisée à l'intérieur du logiciel serait donc justifiable pour des valeurs de profondeur supérieures à environ 50 cm mais en deçà de cette valeur, la prise en compte de la profondeur pourrait peut-être améliorer les résultats.

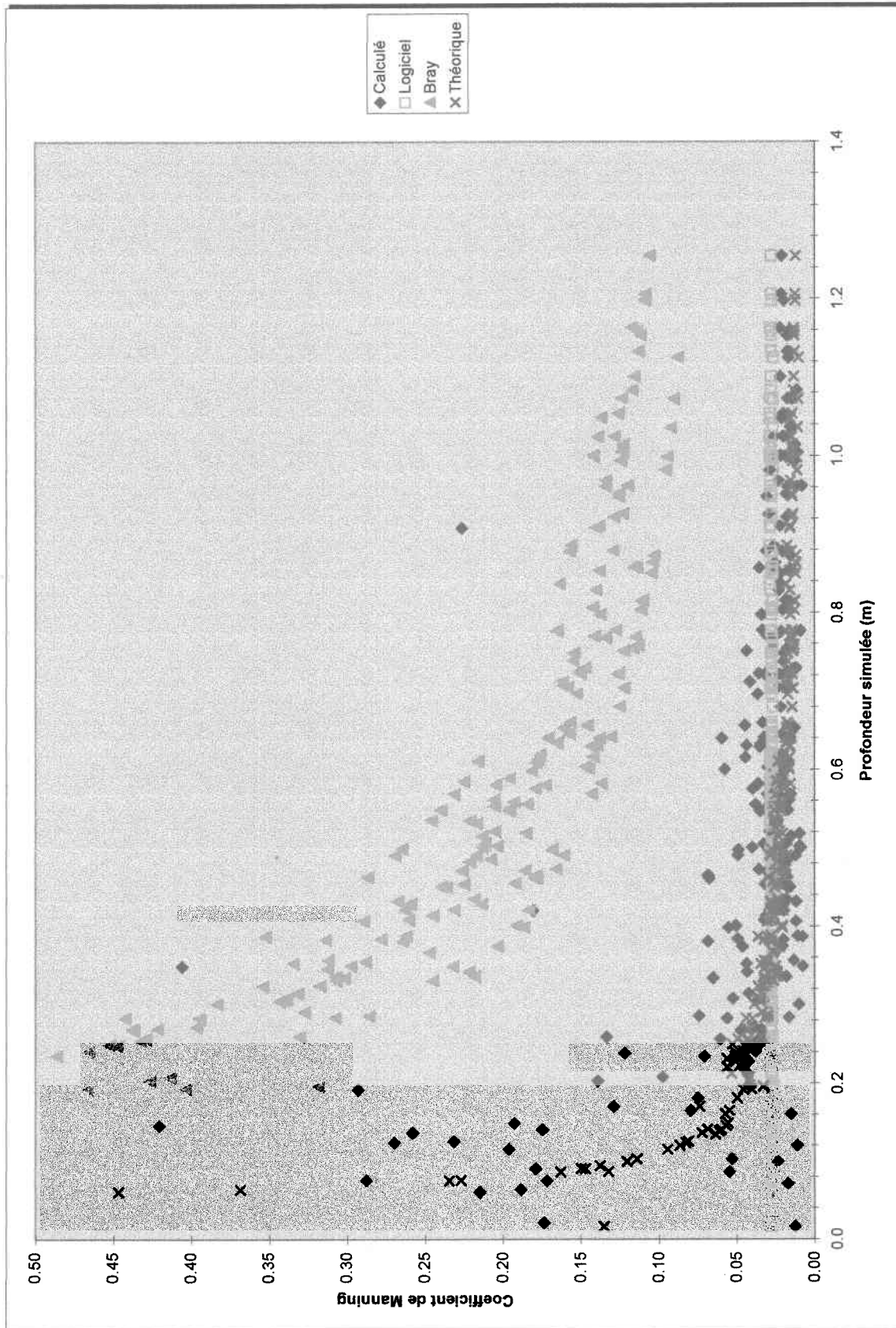


Figure 4.13: Coefficients de Manning calculés en fonction de la profondeur simulée en ces points.

Dans la bibliographie, il est possible de trouver d'autres types d'équations décrivant la résistance due aux rugosités du lit de la rivière. Bray (1970) donne une équation (4.5) qu'il a utilisée pour caractériser plusieurs rivières à lit graveleux en Alberta. Celle-ci tient compte non seulement de la dimension du substrat mais aussi de la profondeur d'eau.

$$\frac{1}{n^{1/2}} = 0,248 + 2,36 \log \left(\frac{H}{d_{50}} \right) \quad (4.5)$$

où,

n = coefficient de Manning

H = profondeur d'eau

d_{50} = diamètre médian des aspérités

Les points représentant les coefficients de Manning (▲) obtenus à l'aide de l'équation de Bray sont présentés à la figure 4.13. À première vue, on remarque que les coefficients calculés à l'aide de cette équation sont beaucoup plus élevés que ceux obtenus à l'aide de l'équation 4.4 ainsi que ceux obtenus dans le MODELEUR. Cependant, l'équation démontre une bonne tendance, c'est-à-dire, une croissance des coefficients de Manning pour de faibles profondeurs. La forme logarithmique de l'équation 4.5, fut donc utilisée pour tenter d'optimiser une nouvelle équation qui permettrait peut-être de bien décrire les coefficients de Manning nécessaires pour tenter d'obtenir une simulation plus exacte. L'équation 4.6 fut donc optimisée pour obtenir des valeurs pour les paramètres A et B .

$$\frac{1}{n^{1/2}} = A + B \log \left(\frac{H}{d_{50}} \right) \quad (4.6)$$

où,

A et B = paramètres à optimiser

L'optimisation a été effectuée en tentant de minimiser la somme des moindres carrés des écarts entre les valeurs obtenues avec l'équation 4.4 et celles de l'équation 4.6. Un minimum a été obtenu avec les paramètres A et B suivants :

Tableau 4.2 : Valeur des paramètres optimisés de l'équation 4.6 permettant de calculer les coefficients de Manning.

Paramètre à optimiser	Valeur obtenue
A	1,37
B	6,40

Les coefficients de Manning « théoriques » obtenus à l'aide de l'équation optimisée sont présentés dans la figure 4.13 (X). On remarque d'abord qu'à faibles profondeurs, les coefficients de Manning obtenus à l'aide de cette équation sont plus élevés que ceux calculés par le logiciel MODELEUR ($\square$) tandis qu'à de plus grandes profondeurs ($> \sim 0,5\text{m}$), les « n » deviennent plus faibles. Les coefficients de Manning calculés à l'intérieur de MODELEUR sont d'environ 0,027 alors que ceux calculés à l'aide de la nouvelle équation sont d'environ 0,010 à une profondeur de 1 m. Il est à noter que les coefficients de Manning diminuent à nouveau aux très faibles profondeurs parce que le diamètre médian du substrat devient plus élevé que la hauteur d'eau et émergerait donc, en principe, à la surface. Ce phénomène se produit très près des berges mais on n'en a pas tenu compte dans le cas présent.

À l'aide de cette équation, les partitions de frottement du MNT ont été changées à l'intérieur de MODELEUR afin de procéder à de nouvelles simulations en utilisant une nouvelle caractérisation de la rugosité du lit dépendante du substrat et de la profondeur d'eau. Le maillage utilisé est celui de la figure 4.1 et le débit simulé fut celui de $2,6 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.4.4 Résultats des simulations effectuées avec une nouvelle paramétrisation du frottement

À l'aide de la relation théorique obtenue par ajustement d'une équation sur les valeurs calculées de « n » de Manning (équation 4.6 avec les paramètres du tableau 4.2), on obtient un écart moyen de 7,6 cm pour la profondeur avec un écart relatif moyen de 18%. Ce résultat est très semblable à celui que l'on avait obtenu lors de la simulation initiale avec les « n » calculés par le logiciel.

Pour les vitesses, en éliminant encore une fois, les vitesses plus basses que 0,10 m/s, on obtient un écart moyen de 0,09 m/s avec un écart relatif moyen de 33%. Il ne semble donc pas y avoir non plus d'amélioration significative du résultat.

4.5 Discussion sur les écarts

Comme on l'a vu précédemment, les écarts obtenus entre les données mesurées sur le terrain et celles obtenues lors des simulations hydrodynamiques peuvent dans certains cas être assez élevés. On doit d'abord mentionner qu'il n'existe pas vraiment de normes concernant l'acceptation ou le refus des résultats d'une simulation. Généralement, on considère une simulation comme étant valable lorsque celle-ci possède des écarts de vitesses en deçà de 10%. Dans la présente étude, les écarts ont été plus élevés que cette valeur dans tous les cas. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ces résultats et elles seront abordées dans les prochaines sections.

4.5.1 Écarts sur les profondeurs

Les écarts que l'on obtient sur les profondeurs sont explicables assez facilement. D'abord, il est important de mentionner que les profondeurs étant généralement assez faibles sur l'ensemble du tronçon (faibles débits), il suffit d'une légère différence de 3 ou 4 cm sur le niveau d'eau simulé pour obtenir des pourcentages d'écarts supérieurs à 20% à certains endroits. Les simulations effectuées avec un maillage très raffiné avaient pour but de réduire à son minimum l'erreur entre les données de topographie récoltées sur le terrain et ces mêmes données reportées sur le maillage hydrodynamique. Cependant, malgré l'utilisation de ces maillages, l'erreur a tout de même été de 11% à son plus bas. Il semblerait donc que l'une des causes d'erreurs est que la topographie récoltée ne soit pas assez précise. Une des premières causes de ces erreurs est que la tige portant le prisme, pénétrait quelque peu dans le lit de la rivière ce qui peut expliquer une erreur de 2 ou 3 cm en certains points tout dépendant de la grosseur du substrat en ces points (la tige pénètre plus facilement dans le sable que dans une zone de galets). De plus, il arrivait que la tige ne soit pas parfaitement verticale pour la prise de certains points à cause des conditions difficiles de prise de mesure dans certaines zones où le courant était plus fort. Par ailleurs, la tige qui était utilisée pour mesurer la profondeur reposait sur le substrat dans le fond de la rivière. Selon Marchand *et al.* (1984), la différence typique entre la profondeur mesurée et le vrai fond est de $\frac{1}{2} d_{50}$. Il faut aussi indiquer ici que la rivière est très alluvionnaire avec de gros substrats en raison de sa forte pente (elle descend d'environ 5 m sur une distance d'approximativement 1,4 km). Ceci a pour effet que, si l'on considère qu'un point a été pris à tous les 4 m², il subsiste un manque d'information sur la topographie à petite échelle (soit l'échelle du poisson).

Cependant, la majorité des points où l'erreur est très élevée, sont des points situés près des rives du cours d'eau. Généralement, la prise de données topographiques est moins intensive dans ces zones. Souvent, un point était pris sur le dessus de la rive et un autre en bas dans la

rivière même. Lorsque le logiciel MODELEUR interpole linéairement les valeurs de topographie entre les points de données, la pente obtenue entre les points du haut de la rive et ceux du bas n'est pas exacte. Si des profondeurs exactes ont été mesurées dans ces zones, l'erreur peut être de plusieurs dizaines de centimètres avec les valeurs interpolées (voir l'explication de la figure 4.14). De plus, sur de faibles profondeurs, il ne suffit que d'une très faible erreur pour dépasser la valeur critique de 10% d'erreur sur les écarts (par exemple, une profondeur interpolée de 10 cm plutôt qu'une profondeur réelle de 20 cm provoquerait une erreur de 50%). Ces explications permettent donc de dire que, dans les conditions actuelles, les écarts de profondeurs observés sont en grande partie dus aux erreurs normales de mesures, et se situent aux limites intrinsèques de la méthode de discrétisation et d'interpolation du modèle.

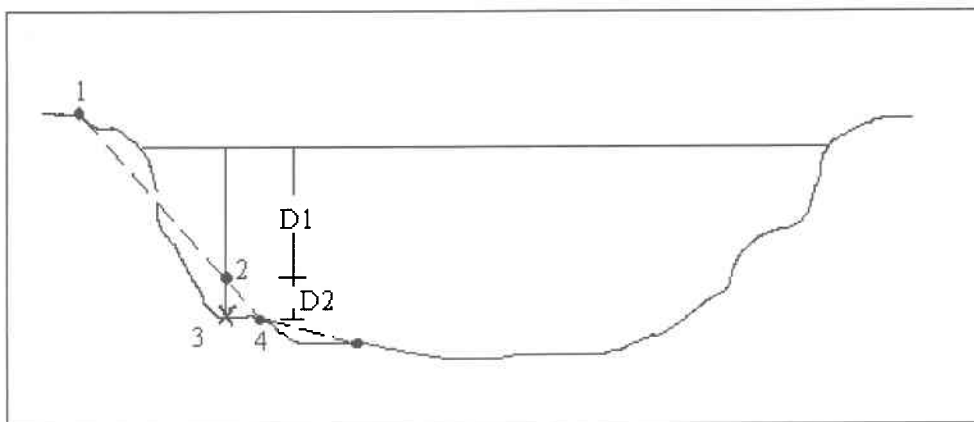


Figure 4.14 : Représentation de l'interpolation effectuée par MODELEUR entre les points de topographie 1 et 4 (ligne pointillé). Si une profondeur est mesurée au point 3 (profondeur de $D1 + D2$), la profondeur à cet endroit sur le MNT (point 2) sera seulement de $D1$ d'où une différence de $D2$ entre les deux topographies (la topographie réelle et celle reportée sur le MNT).

4.5.2 Écarts sur les vitesses

L'élément central de la problématique de la présente recherche est la validation des champs de vitesses simulées par HYDROSIM. Pour tenter de calibrer et valider les simulations, on a calculé les écarts entre différentes vitesses calculées par le logiciel avec des vitesses mesurées sur le terrain dont on connaissait la localisation exacte sur le tronçon (vitesse mesurées où des poissons ont été observés). Les écarts ont été assez importants, si bien que plusieurs nouvelles voies ont dû être explorées afin de tenter de les diminuer. Pour ce faire, il a fallu que l'on se pose plusieurs questions concernant les ensembles de données que l'on tentait de comparer. Par exemple, est-ce que les erreurs élevées proviennent d'un problème relié aux simulations, aux mesures ou aux deux ? Aussi, est-ce correct d'assumer que l'on peut comparer directement les deux ensembles de données (simulées et mesurées) sans adaptation aucune ? Sont-ils vraiment homogènes entre eux ?

Avant de pouvoir répondre à ces questions, il est important de rappeler le rôle des vitesses dans la modélisation des microhabitats. On doit d'une part connaître la gamme de vitesses optimales qui permet au poisson d'assurer sa survie, et d'autre part, on doit calibrer et valider les vitesses simulées de façon à calculer la distribution de l'habitat.

Considérons d'abord l'aspect biologique. Le poisson choisit généralement un territoire lui fournissant un endroit où il peut se maintenir dans le courant sans trop dépenser d'énergie. De plus, cet endroit doit se trouver dans une région où il y a une dérive d'insectes apte à fournir assez de proies pour que le poisson puisse se nourrir suffisamment pour satisfaire ses besoins bioénergétiques (son métabolisme, sa croissance, etc.) et s'assurer qu'il puisse être compétitif envers les autres poissons. Il est important de faire un choix éclairé quant à la vitesse à mesurer. Si l'on veut connaître la préférence du poisson au niveau de l'aire de repos qu'il a sélectionné, il faut mesurer la vitesse au nez du poisson puisque c'est la vitesse contre laquelle le poisson doit lutter directement pour se maintenir en position d'attente dans la colonne d'eau. Par contre, si l'on suppose que le poisson recherche avant tout un

territoire de chasse, il faut mesurer une ou des vitesses caractérisant celui-ci. Si le milieu est constitué de vitesses assez homogènes et uniformes, on peut considérer la vitesse moyenne de la colonne d'eau comme étant une bonne représentation des conditions que le tacon doit subir pour atteindre sa proie peu importe s'il quitte la roche qui l'abritait pour monter directement vers la surface ou s'il se déplace diagonalement ou latéralement. Quant à l'abri, il se retrouve généralement associé à la zone de décrochement de l'écoulement derrière les plus gros substrats. Une mesure de vitesse dans cette zone n'est pas requise car il suffit de savoir qu'un tel substrat est disponible en quantité suffisante à un endroit donné. C'est donc l'indice de base de substrat qui rend compte du facteur abri dans le modèle d'habitat. C'est donc la vitesse moyenne de la colonne d'eau qui est généralement utilisée. Comme ces vitesses sont homogènes avec celles produites par le modèle hydrodynamique (moyennes de la colonne d'eau), ces dernières peuvent être directement transformées en valeurs d'habitat avec les indices du modèle biologique.

Pour ce faire, il faut être en mesure de calibrer et valider le modèle numérique de terrain. Généralement, la technique consiste à comparer les résultats des simulations avec plusieurs vitesses mesurées sur le tronçon étudié. De la sorte, on peut rajuster le modèle pour un débit donné et finalement, le valider avec un autre débit. C'est la méthode classique. Dans le cas présent, il a été convenu d'utiliser les vitesses mesurées où les poissons ont été observés afin de valider les simulations. À priori, cette idée semblait bonne puisque le nombre de vitesses mesurées était important et que la prise des vitesses était bien intégrée à la caractérisation des habitats du poisson. Ceci fournissait donc un grand nombre de vitesses mesurées afin de valider le modèle.

C'est en comparant les valeurs mesurées et simulées qu'on s'est rendu compte qu'il y avait un problème d'écarts. Le fait d'avoir seulement pris des mesures dans la colonne d'eau aux points d'attente du poisson ne permet pas dans ce cas d'observer l'hétérogénéité des vitesses réelles de la zone étudiée puisque le poisson est généralement installé dans une zone de faibles vitesses pour y attendre ses proies. Ces mesures étant encore entachées du

préférendum d'attente du poisson, elles ne peuvent être considérées représentatives du territoire de chasse. On ne peut donc pas, par la suite, les utiliser directement pour valider l'ensemble du domaine simulé. Dans le cas présent, la taille des substrats n'était pas telle qu'elle invalidait la prise de mesure classique. L'hypothèse d'hétérogénéité des ensembles de données fut donc rejetée.

On peut toutefois comparer la variabilité du champ de vitesses simulées sur l'ensemble du domaine avec les vitesses mesurées localement afin de voir si les gammes de vitesses correspondantes s'étendent sur la même gamme. Si les vitesses simulées sur le domaine possèdent une plus grande variabilité que les vitesses mesurées, ceci veut dire qu'il est possible que les vitesses réelles sur le domaine possédaient une gamme plus large que celles qui ont put être observées par mesure directe. Toutefois, on ne peut le vérifier avec les données recueillies. Si par contre, la gamme des vitesses simulées sur le domaine est plus étroite que celle des vitesses mesurées ceci voudra dire que malgré le fait que l'on ne peut connaître toute la variabilité réelle des vitesses, il est clair qu'il existe un problème relié aux vitesses simulées. Pour vérifier ceci, on a comparé certaines statistiques des vitesses simulées et mesurées ainsi que celles du champ de vitesses simulées sur l'ensemble de la zone d'observation à divers débits.

4.5.3 Analyse statistique des données mesurées et simulées

Le tableau 4.3 présente les statistiques de base des divers ensembles de données sur les vitesses : moyenne, écart-type et maximum. D'abord, voici comment ces valeurs ont été obtenues. Pour un certain débit, on possède un ensemble de données mesurées couvrant une certaine portion du tronçon étudié. Par exemple, les vitesses mesurées en certains points au débit de $2,6 \text{ m}^3/\text{s}$ sont réparties sur une distance de 150 m de rivière (la rivière ayant une trentaine de mètres de large). La moyenne, l'écart-type et la valeur maximale ont été calculés pour ces vitesses à l'intérieur de la zone de 150 m. La même chose fut ensuite fait

pour les vitesses simulées à ces points de mesure. Finalement, les mêmes statistiques ont été obtenues pour l'ensemble des vitesses simulées aux noeuds des éléments finis couvrant l'entière surface de 150 m par 30 m de rivière (domaine).

Si l'on examine les valeurs calculées pour le débit de $2,6 \text{ m}^3/\text{s}$, les vitesses simulées au point de mesure, quoique ayant une moyenne quasiment identique à l'ensemble des valeurs mesurées, n'ont pas la même gamme de variabilité.

Tableau 4.3: Données statistiques pour les vitesses mesurées et simulées aux endroits où des poissons ont été localisés ainsi que pour les domaines (sections de tronçon) où les observations ont été faites pour les trois débits simulés à l'aide d'HYDROSIM (Sim.= Vitesses simulées localisées, Mes.=Vitesse mesurées localisées et Dom.=Champ de vitesses simulées sur le domaine).

	Débit de $2,6 \text{ m}^3/\text{s}$			Débit de $3,3 \text{ m}^3/\text{s}$			Débit de $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$		
	Vitesses			Vitesses			Vitesses		
	Mes.	Sim.	Dom.	Mes.	Sim.	Dom.	Mes.	Sim.	Dom.
Moyenne (m/s)	0,24	0,24	0,24	0,39	0,45	0,40	0,42	0,43	0,43
Écart-type (m/s)	0,13	0,07	0,08	0,19	0,23	0,21	0,19	0,10	0,16
Maximale (m/s)	0,48	0,37	0,37	0,88	1,03	1,04	0,86	0,63	0,73

En effet, pour cette zone, la moyenne est de $0,24 \text{ m/s}$ pour les deux ensembles de vitesses. Cependant, pour les vitesses mesurées, l'écart-type est de $0,13 \text{ m/s}$ alors que pour celles simulées, il est de $0,07 \text{ m/s}$. De plus, toujours pour le même débit, la vitesse maximale mesurée pour l'ensemble des poissons a été de $0,48 \text{ m/s}$ alors qu'elle est de $0,37 \text{ m/s}$ pour les valeurs simulées. On observe donc que les gammes de vitesses simulées et mesurées sont centrées sur la même valeur mais ne possèdent pas la même étendue. Maintenant, si l'on considère le champ de vitesses sur tout le domaine simulé (valeurs au noeuds), on trouve encore la même vitesse moyenne ($0,24 \text{ m/s}$) ainsi que la même vitesse maximale de

0,37 m/s que l'ensemble des vitesses simulées aux points d'observation des poissons. Il semble alors que pour le débit de $2,6 \text{ m}^3/\text{s}$, les diverses vitesses simulées en ces points, étaient représentatives du champ de vitesses simulé sur l'ensemble du domaine couvert. Les écarts observés sont donc en partie expliqués par cette différence d'étendue entre les deux gammes de données.

Si on observe les données pour le débit de $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$, on obtient un comportement semblable en cela que l'étendue des valeurs simulées est plus étroite que celle des vitesses mesurées. Cette fois-ci cependant, on remarque une différence entre l'étendue des vitesses simulées où les poissons étaient présents et celles sur l'ensemble du domaine. En effet, l'écart-type du champ de vitesses sur le domaine est plus grand (0,16 m/s) que celui des vitesses simulées aux points de mesure (0,10 m/s). Ceci veut dire que les points de mesure ne sont pas entièrement représentatifs de l'ensemble de la zone de rivière où les poissons ont été observés. On peut alors supposer que la section de rivière où les données ont été prises présentait une variabilité de vitesses plus élevée que celle observée avec les vitesses mesurées mais il est impossible de savoir quelle était cette variabilité. Il y a donc encore une fois une différence entre les deux ensembles de données ce qui laisse croire qu'il existe une cause expliquant les écarts élevés entre les données mesurées et simulées.

Le comportement est différent pour le débit de $3,3 \text{ m}^3/\text{s}$. Les valeurs de vitesses simulées sont plus élevées que les valeurs mesurées pour ce débit. On se rappellera que l'écart moyen sur les profondeurs pour le débit de $3,3 \text{ m}^3/\text{s}$ était assez élevé (8,4 cm) contrairement aux deux autres débits. En observant les données de cette simulation, on remarque que les profondeurs simulées étaient généralement plus forte que celles mesurées. Il est probable que cette erreur sur les profondeurs ait entraîné une augmentation de l'amplitude des vitesses simulées.

Ce qui semble ressortir de ces analyses est que les simulations donnent généralement des valeurs de vitesses qui sont lissées (gamme simulée plus étroite) comparativement aux valeurs mesurées. Le modèle ne capte donc pas les éléments perturbateurs qui

influencent la distribution et l'amplitude des vitesses dans la rivière et qui en augmentent l'hétérogénéité locale. Ceci laisse croire que la méthode de mesure n'était peut-être pas tout à fait appropriée pour les diverses conditions présentes dans le cours d'eau et que des données additionnelles seraient nécessaires pour effectuer soit ; une simulation qui se rapproche encore plus des conditions réelles observées sur la rivière ou bien, une validation différente de la simulation.

À faible profondeur, le substrat devient très influent sur la masse d'eau ; celle-ci doit s'écouler entre les roches, ce qui l'accélère et la ralentit à petite échelle, introduisant beaucoup d'hétérogénéité dans le cours d'eau. Malheureusement, il est impossible de tenir compte de chaque granulat du substrat dans le modèle si l'on tient compte qu'il y a un point de données topographiques pris à environ tous les 4 m². Ceci explique peut-être la plus faible variabilité des vitesses simulées et on devrait donc observer des écarts plus importants entre les vitesses mesurées et simulées, à faibles profondeurs (ce qui est effectivement le cas comme on le verra plus loin ; voir la figure 4.16).

Il est possible aussi que l'hypothèse concernant la possibilité de décrire le territoire de chasse du poisson avec une seule vitesse mesurée dans la colonne d'eau ne soit plus appropriée. Si le milieu est très hétérogène, il est peut-être nécessaire de modifier la façon dont les données sont récoltées. Certaines recommandations seront faites plus loin afin d'avoir une meilleure description de la zone que le poisson a choisie comme habitat préférentiel.

Si l'on revient maintenant au phénomène causé par les faibles profondeurs, il faut aussi mentionner qu'une influence importante du substrat peut provoquer une modification du profil vertical de la vitesses de telle façon qu'il n'est plus bien représenté par une loi logarithmique comme on le suppose habituellement, dans le type milieu fluvial. Plusieurs chercheurs (Ferro et Baiamonte, 1992 ; Wiberg et Smith, 1991 ; Bathurst, 1988) ont démontré que dans certaines conditions, le profil des vitesses prend l'aspect d'un S et même parfois d'un U (la vitesse maximale de la colonne d'eau n'étant plus à la surface libre mais

plutôt quelque part dans la colonne). Le protocole de mesure utilisé (une vitesse à $0,6H$) dans le cas présent ne permet pas de reproduire le profil d'une colonne d'eau mais l'importance du substrat comparativement aux profondeurs d'eau (le rapport H/d_{50} moyen est de 8 pour une gamme s'étendant de valeurs de 1 jusqu'à 15) suggère que le profil du cours d'eau étudié possédait probablement une forme en S (voir figure 4.15). On ne peut alors plus assumer qu'une vitesse prise à $0,6H$ de la surface représente bien la vitesse moyenne de la colonne.

Comme on l'a mentionné auparavant, si l'on observe la figure 4.16, on remarque que les écarts les plus importants se situent aux endroits où les profondeurs sont les plus faibles. Ce dernier graphique permet donc de voir que les écarts élevés proviennent en bonne partie des zones de faibles profondeurs et conséquemment, le plus souvent de faibles vitesses. En éliminant les vitesses plus faibles que $0,05 \text{ m/s}$, on observe que les erreurs commencent à être plus importantes à des profondeurs d'environ 40 cm et moins.

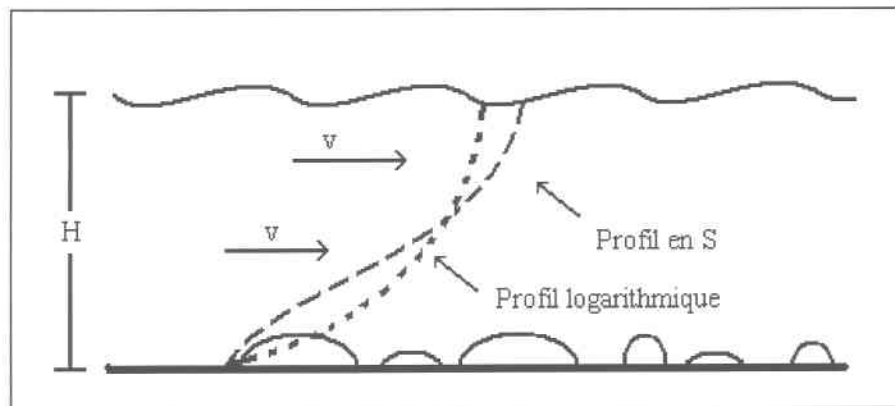


Figure 4.15 : Représentation d'un profil de courant en forme de S dû à l'importance de la dimension du substrat comparativement à la profondeur (rapport H/d_{50} faible).

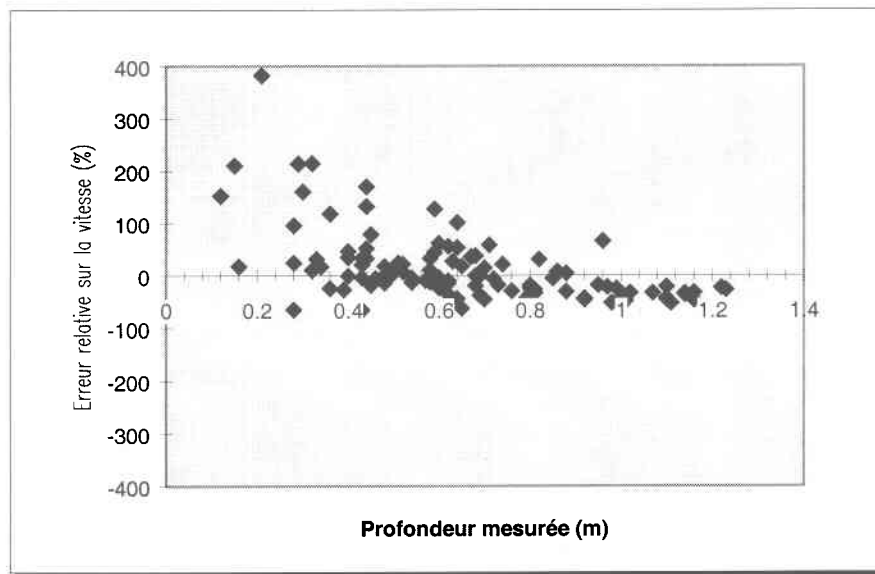


Figure 4.16 : Erreur relative sur les vitesses en fonction de la profondeur mesurée selon les résultats obtenus avec la simulation effectuée au débit de 2,6 m³/s à l'aide du maillage de la figure 4.9.

On en arrive donc à la conclusion que les deux ensembles ne sont probablement pas suffisamment homogènes entre eux. Les vitesses simulées par HYDROSIM semblent être lissées par un manque d'information à l'échelle de l'habitat du poisson. Les vitesses mesurées localement, quant à elle, ne permettent pas de ramener l'information à un niveau où l'on pourrait les comparer avec les vitesses simulées. Si on avait eu plus de vitesses mesurées sur une plus petite échelle, il aurait été possible de vérifier l'hypothèse concernant les vitesses simulées, à savoir si celles-ci sont bel et bien des vitesses moyennes de celles observées sur la rivière. De plus, le débit s'écoulant dans la rivière lors des mesures n'était pas nécessairement constant durant une journée d'où des erreurs possibles lorsqu'on compare les deux ensembles de données. Il n'est pas impossible non plus que la formulation mathématique d'HYDROSIM puisse être en cause. La forme conservative des équations de Saint-Venant, intégrées sur la verticale, pourtant largement reconnue dans la bibliographie, comporterait-elle des hypothèses simplificatrices (ex : pression hydrostatique, couche limite turbulente présentant un profil de vitesse logarithmique) qui ne

se vérifient pas suffisamment dans le cas limite des petits cours d'eau alluvionnaires en débit d'étiage ? Faudrait-il songer à injecter dans ce modèle une composante d'équilibre des forces qui tiendrait compte plus adéquatement de l'hétérogénéité locale (forts gradients) du champ de vitesse, particulièrement quand le rapport H/d_{50} s'amenuise ? L'algorithme de prise en compte de l'assèchement des berges (couvrant-découvrant) introduirait-il un biais dans la répartition des vitesses ?

Toutes ces questions qui débordent largement le sujet de ce mémoire en plus de celles reliées à l'homogénéité des ensembles de données mesurées et simulées méritent une attention accrue afin de dissiper le doute qui subsiste après cet exercice.

Du côté biologique, on peut même se questionner sur ce qui amène le poisson à choisir un certain territoire de chasse plutôt qu'un autre. Il se peut qu'à l'intérieur d'une certaine zone choisie par celui-ci, la vitesse la plus importante soit la vitesse la plus élevée, et ce, parce que c'est cette vitesse qui crée une veine d'eau entraînant les organismes et qui permet une arrivée de nourriture pour le poisson. Il y aurait à ce moment un problème d'homogénéité entre les deux ensembles de données puisque le modèle fournit des vitesses moyennes. Des idées seront proposées à la section 6.1 afin de permettre d'améliorer les résultats et d'assurer que les ensembles comparés sont plus homogènes entre eux.

5. SIMULATION D'HABITAT

Si l'on veut pouvoir déterminer les débits minimums requis, dans un certain cours d'eau, pour conserver une quantité suffisante d'habitats de qualité, on doit être en mesure de déterminer les indices de préférences pour les trois variables abiotiques principales servant à caractériser le microhabitat du tacon. Malgré les incertitudes dans le calcul des vitesses, les valeurs d'*APUs* ont tout de même été calculées d'abord parce que la vitesse ne représente qu'une seule des trois variables impliquées dans le calcul et qu'une incertitude dans celle-ci, à condition qu'elle soit aléatoire, ne représente pas un problème dans l'interprétation des courbes d'*APU* (Lafleur, 1997). En effet, même en introduisant artificiellement des incertitudes de l'ordre de 100% sur cette variable, la courbe d'*APU* résultant en fonction du débit n'a pas démontré une grande sensibilité au procédé.

5.1 Construction et paramétrisation

Pour construire les courbes de préférences des tacons du saumon atlantique, on a besoin des fréquences d'utilisation du milieu par le poisson variable par variable. On a aussi besoin des fréquences de disponibilité de ces variables dans le milieu. Dans le premier cas, on travaille avec les valeurs obtenues aux sites d'observation des tacons. On sépare chacune des variables abiotiques (profondeur, vitesse et substrat) en diverses classes à l'intérieur desquelles on dénombre le nombre de tacons observés. Par exemple, on a créé pour la profondeur, des classes de 0,15 m allant de 0 m jusqu'à 1,35 m (aucun poisson n'ayant été vu à des profondeurs plus grandes que 135 cm dans le cours d'eau, celui-ci étant en étiage). Pour la vitesse, des classes de 0,15 m/s ont été établies allant de 0 à 1,5 m/s tandis que pour le substrat, des classes de 1,5 cm (pour le d_{50}) ont été utilisées. Dans ce dernier cas, la gamme des classes de d_{50} observées dans le milieu s'arrêtait à 7,5 cm (le d_{50} étant une

valeur médiane de l'ensemble du substrat observé). En dénombrant les tacons pour chacune des classes et en sachant le nombre total de tacons observés, on obtient alors une fréquence relative d'observation.

Pour ce qui est des fréquences disponibles dans le milieu, on peut soit intégrer la surface des classes (relative ou absolue) de variable dans MODELEUR, ou encore, assigner aux noeuds du maillage un poids uniforme et utiliser une technique de fréquence semblable à celle employée pour l'utilisation du milieu par le tacon. Cette deuxième méthode a été jugée suffisante à cause de la distribution assez uniforme des noeuds. L'indice de base pour chacune de ces variables est le quotient des fréquences relatives d'utilisation et de disponibilité normalisé à un sur la valeur maximale.

5.2 Application du modèle : calcul des aires pondérées utiles (*APU*)

Une fois que les courbes de préférences sont obtenues, on peut procéder à l'application de ce modèle pour connaître la distribution de l'habitat préférentiel dans le tronçon et ce, pour chacun des débits de la gamme jugée intéressante. Par la suite, on intègre cette valeur d'habitat sur tout le tronçon pour en connaître la disponibilité totale (*APU*) à débit donné.

Ceci est fait en convertissant d'abord chacune des valeurs de profondeur, de vitesse et de d_{50} de substrat présentes sur le MNT en indices de base distribués d'habitat. Ces indices de base permettent de calculer un indice global partout sur le tronçon de rivière à l'aide de l'équation 2.16 présentée à la page 31. Les poids a_p , a_v et a_s utilisés pour le calcul sont ceux déterminés par Leclerc et *al.* (1995) pour la rivière Moisie. Après calcul des indices globaux, il ne reste plus qu'à évaluer l'aire pondérée utile (*APU*) sur le tronçon pour chaque débit simulé. Cela a été fait à des débits de 2,6, 3,3 et 9,2 m³/s en utilisant la méthode présentée dans le chapitre 2.

5.3 Courbes de préférence et valeurs d'APUs

Les courbes de préférence d'habitat du jeune saumon de la rivière Sainte-Marguerite (1+, 2+) pour la profondeur, la vitesse et le substrat sont données aux figures 5.1 à 5.3 respectivement.

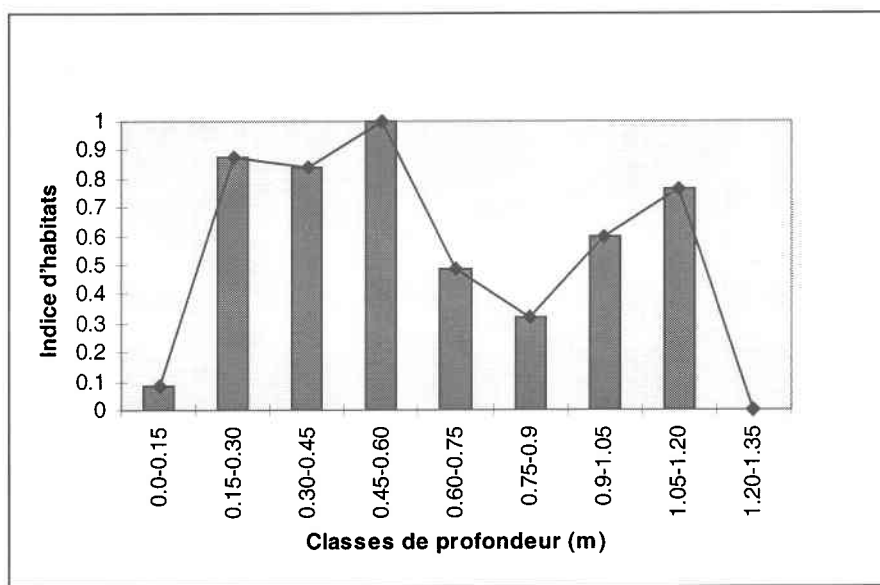


Figure 5.1 :Indices de préférence de profondeur pour les tacons de saumon atlantique d'âge 1+ et 2+.

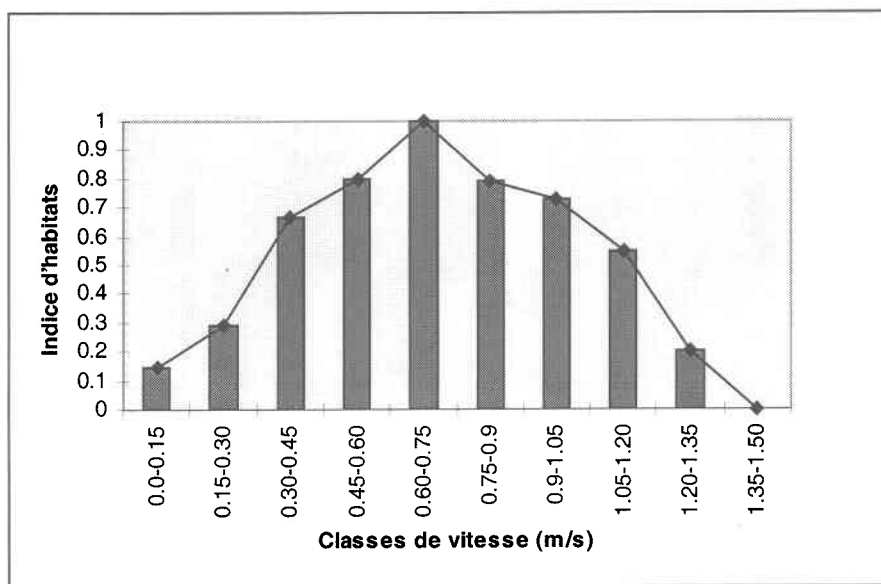


Figure 5.2 :Indices de préférence de vitesse pour les tacons de saumon atlantique d'âge 1+ et 2+.

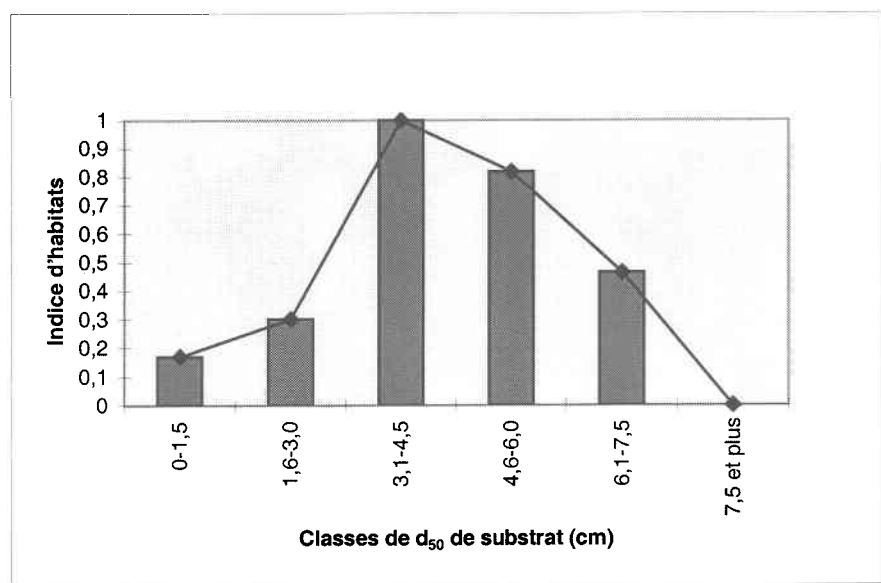


Figure 5.3 :Indices de préférence de d_{50} de substrat pour les tacons de saumon atlantique d'âge 1+ et 2+.

Grâce à ces courbes, des indices globaux (I_G) ont été calculés partout sur le tronçon à

l'étude. En guise d'illustration, on peut voir sur les figures 5.4 à 5.6, les isosurfaces correspondants à ces indices pour des débits de 2,6, 3,3 et 9,2 m³/s. Une première constatation est que plusieurs zones obtiennent une valeur d'indice global de zéro à cause de l'indice de base d'habitat du substrat. Grâce à ces indices, on a ensuite déterminé les valeurs d'*APU* pour des débits de 2,6, 3,3 et 9,2 m³/s. Ces *APUs* correspondent aux indices globaux d'habitat compris entre 0,7 et 1,0, ce qui est considéré comme étant l'optimum pour le poisson. Les résultats sont présentés dans le tableau 5.1.

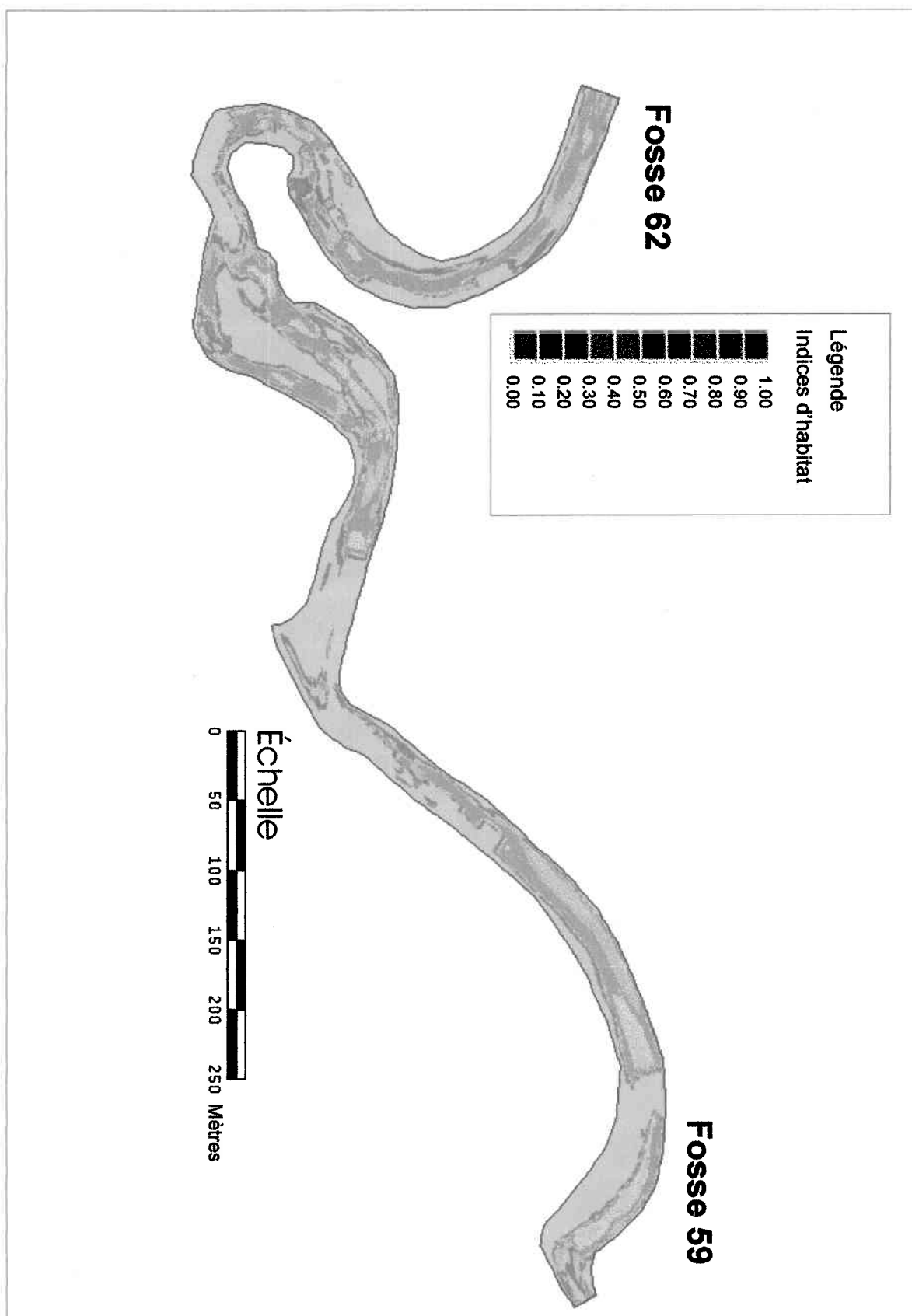


Figure 5.4: Isosurfaces des indices d'habitat générées à l'aide du logiciel MODELLEUR pour un débit de 2,6 m³/s.

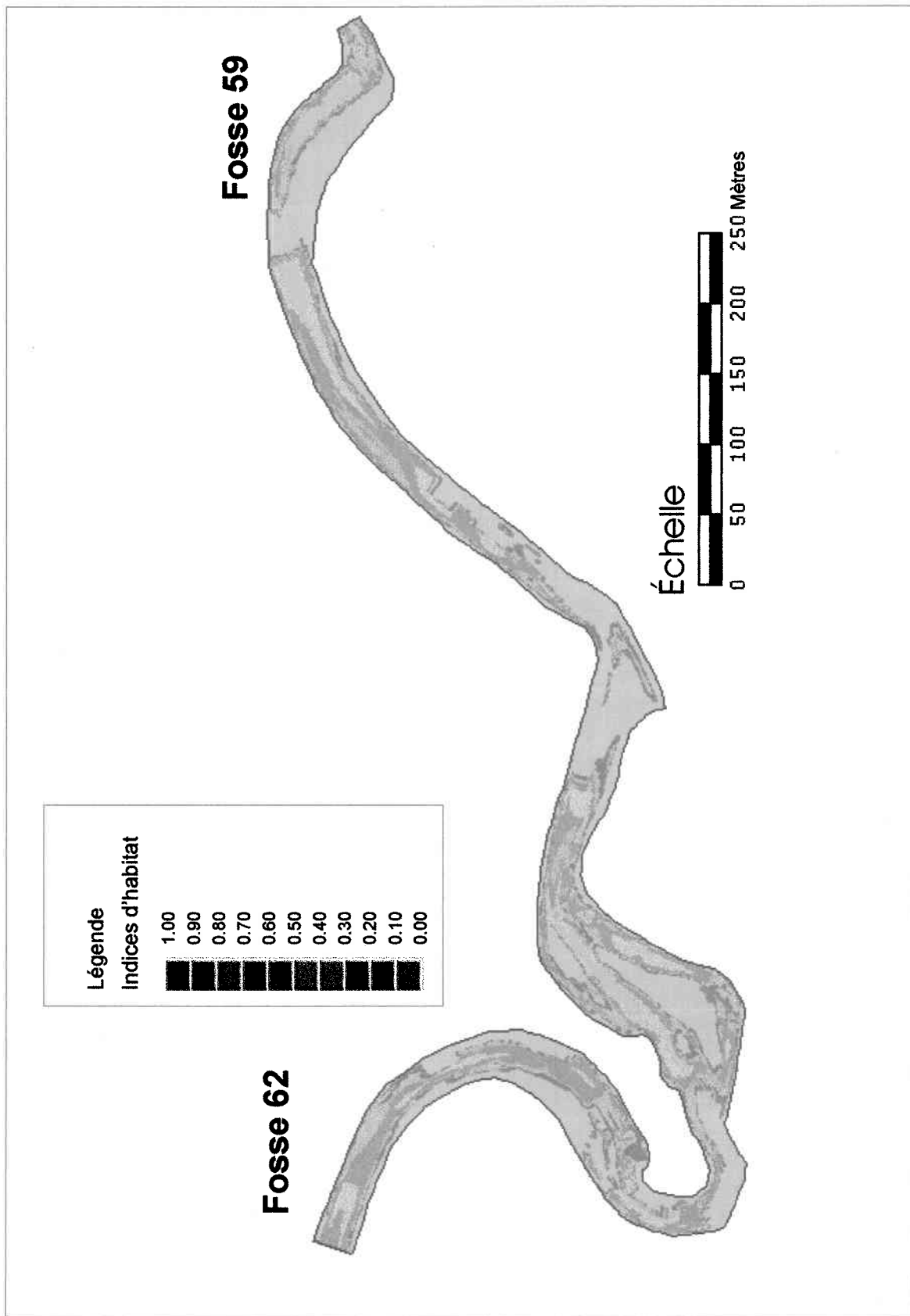


Figure 5.5: Isosurfaces des indices d'habitat générées à l'aide du logiciel MODELEUR pour un débit de $3,3 \text{ m}^3/\text{s}$.

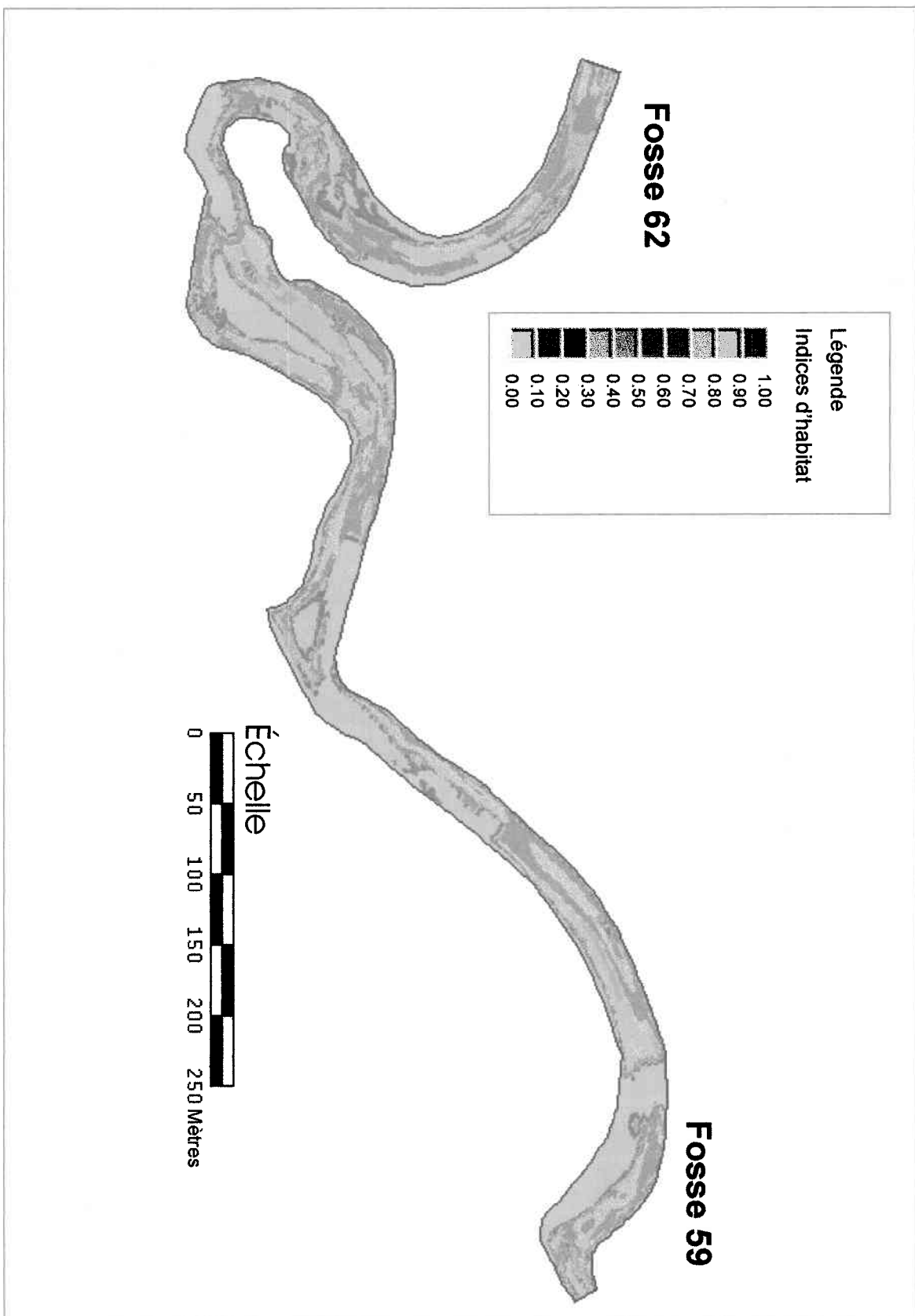


Figure 5.6: Isosurfaces des indices d'habitat générées à l'aide du logiciel MODELEUR pour un débit de $9,2 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tableau 5.1 : Aires pondérées utiles (avec $0,7 < I_g < 1,0$) calculées pour différents débits simulés.

Débit (m ³ /s)	Aire pondérée utile (APU) (m ²)	Aire pondérée utile relative (APU%)
2,6	12345,5	36,6
3,3	14764,7	42,0
9,2	18959,8	47,3

Les débits présentés ici représentent sensiblement la gamme des débits ayant été observés à l'été 1997. On observe d'abord que plus le débit augmente, plus les APU sont élevés. Il est bien évident que ces débits sont trop bas pour observer la valeur maximale de disponibilité d'habitat que pourrait offrir ce cours d'eau avec une hydraulicité mieux soutenues.

6. CONCLUSION

6.1 Recommandations sur les techniques à utiliser pour caractériser et modéliser les petits cours d'eau alluvionnaires

Suite aux difficultés de validation du modèle hydrodynamique, il apparaît clairement que certaines étapes méthodologiques contenaient des lacunes. Le but était initialement de modéliser les habitats du saumon atlantique sur la rivière Sainte-Marguerite. Pour ce faire, il fallait procéder à une campagne de terrain qui allait permettre, par la suite, de créer un modèle numérique de la rivière en question. À partir de ce modèle, il serait alors possible de localiser les aires pondérées utiles correspondant aux zones d'habitats préférentiels. Toutefois, les résultats au niveau des vitesses ne donnaient pas exactement ce qui avait été escompté. Il fut donc entrepris de déterminer quelle était la cause de ce problème. Le présent projet étant effectué conjointement par deux équipes de recherche, l'une des équipes, la nôtre, s'est penchée sur l'étude des causes d'erreurs au niveau des vitesses tandis que l'autre équipe (Université de Montréal) a poursuivi la réalisation du projet en vue de l'obtention des indices d'habitat. Malgré les incertitudes au niveau des vitesses, il a été décidé, en se fiant aux résultats obtenus par Lafleur (1997), que celles-ci ne devraient pas influencer de façon importante les valeurs d'*APU*.

Il serait facile de prétendre que les écarts importants observés sur les vitesses sont causées par la simulation hydrodynamique et ainsi conclure que la technique n'est pas au point, du moins pour les petits cours d'eau alluvionnaires. Cependant, l'analyse de l'ensemble des données (mesurées et simulées) a permis de mettre à jour certaines erreurs qui ont été

commises lors de la caractérisation de la rivière et qui ont peut-être été responsables des écarts observés. Le but de cette section est donc de faire certaines recommandations afin que ces erreurs ne soient plus répétées dans le futur par d'autres équipes de chercheurs. À l'aide de celles-ci, une caractérisation plus adéquate de la rivière devrait être possible. Ceci permettra, dans l'éventualité où des problèmes similaires à ceux rencontrés lors de ce projet se répéteraient, d'affirmer hors de tout doute que les données récoltées ne sont pas en cause. Le but est donc de recueillir des données plus appropriées qui formeront un ensemble homogène avec ce que le logiciel HABIOSIM peut donner comme résultat. Ainsi, la validation des simulations pourra être effectuée correctement. Les recommandations seront introduites dans l'ordre des étapes de la caractérisation du terrain.

6.1.1 Sur la topographie

La première étape consiste à effectuer des relevés topographiques sur la rivière qui permettront par la suite, après incorporation de ces données dans le logiciel MODELEUR, de procéder à la création du maillage hydrodynamique et aux simulations. Comme on l'a vu précédemment, malgré un ensemble important de points, il semble tout de même que les données recueillies ne permettent pas de reproduire toute la variabilité présente sur le terrain. En fait, l'idéal serait de prendre une quantité de points encore plus grande mais les efforts que cela nécessiterait seraient assez pour décourager une majorité de chercheurs. Il faut donc tenter de déterminer où les efforts devraient se concentrer. Si on observe la figure 4.16, on voit que les problèmes au niveau des vitesses simulées se retrouvent surtout dans les zones de faibles profondeurs. À des profondeurs de 60-70 cm et moins, les écarts entre les vitesses simulées et mesurées deviennent plus importants. On devrait donc tenter de prendre plus de points de mesure topographiques dans les zones de faibles profondeurs si l'on retrouve un des deux cas suivant : la structure morphologique du lit est très irrégulière ou bien, le substrat y est très grossier et hétérogène.

Ces zones de faibles profondeurs se retrouvent notamment près des rives, qui sont des zones où les erreurs peuvent avoir été causées par deux éléments : une mauvaise définition des rives (voir figure 4.14) qui entraîne des erreurs sur les profondeurs simulées qui se répercutent sur les vitesses simulées par le fait que l'écoulement de la masse d'eau est décalé par rapport à la réalité, et aussi, une influence importante du substrat sur la masse d'eau à cause des faibles profondeurs.

En fait, les rives qui sont le plus à risque sont celles qui se retrouvent du côté externe des méandres (courbes). Ces rives ont généralement été creusées par érosion et plutôt que de monter en pente douce le font plutôt de façon abrupte. Il est donc important de bien délimiter celles-ci pour éviter les erreurs sur les profondeurs comme on l'a vu précédemment. Il est également important de contrôler la fermeture adéquate du polygone de nivellement ce qui n'a pas été fait dans le présent projet.

6.1.2 Sur les niveaux d'eau

Un autre problème rencontré a été de bien valider la ligne d'eau sur l'ensemble de la rivière (la ligne d'eau étant la hauteur d'eau par rapport à un niveau topographique de référence, d'un bout à l'autre de la rivière). Sur le terrain, des tiges de mesures ont été installées aux deux extrémités de la rivière afin de mesurer le niveau d'eau à tous les jours. De plus, lors de la collecte des données sur une zone intermédiaire du tronçon à l'étude, des niveaux d'eau supplémentaires étaient enregistrés afin d'avoir des valeurs de validation à cet endroit. Cependant, après avoir simulé à certains débits, il arrivait que l'on ne puisse pas bien valider le niveau d'eau pour certaines sections de la rivière où aucune donnée n'avaient été récoltée. L'idéal serait donc d'avoir des points de mesure distribués sur l'ensemble du tronçon pour chaque débits simulés. Selon la longueur du tronçon de rivière étudié, un ensemble de 5 à 10 points de référence permettrait de bien valider le niveau d'eau sur l'ensemble du parcours de la rivière.

Concernant la technique de mesure, une tige graduée est insérée dans le sol avec une extrémité qui sort de l'eau de plusieurs centimètres pour permettre une lecture plus facile. Cependant, cette tige peut parfois être encombrante, on propose donc plutôt de géoréférencer des tiges qui seront complètement enfouies dans le lit de façon à ne pas gêner l'écoulement de la rivière ou toute autre activité pouvant avoir lieu sur celle-ci. De cette façon, il est possible de mesurer à chaque jour le niveau d'eau à l'aide d'une règle que l'on positionne sur la tige.

6.1.3 Sur les vitesses de courant

On doit accorder une attention toute particulière à la façon dont les vitesses sont récoltées sur le terrain. D'abord, il est important de s'assurer que l'on utilise le courantomètre convenablement. Certains ajustements doivent parfois être faits sur l'appareil avant que celui-ci puisse être utilisé sinon, des erreurs importantes peuvent survenir. Il faut aussi s'assurer que les manipulations sont effectuées toujours de la même façon afin de ne pas introduire de biais. Entre autres, il est important que la tige de l'appareil soit maintenue verticalement lorsque l'on effectue une mesure sinon, la vitesse mesurée pourrait être inexacte. On peut s'assurer d'éliminer la variabilité temporelle en prenant des mesures pendant des périodes plus longues, c'est-à-dire, d'une minute ou plus. Il faut aussi tenir compte du fait que lorsque le courantomètre repose sur le substrat, il y a une petite erreur introduite sur la hauteur à laquelle la vitesse est enregistrée par rapport au lit réel (que l'on considère comme étant la position moyenne du lit de la rivière si on élimine les granulats d'une grosseur apte à empêcher au courantomètre de bien reposer au fond de la rivière sur toute la surface de son pied). Afin d'avoir des vitesses de validation réparties sur l'ensemble du tronçon à l'étude, quelques vitesses pourraient être prises aux endroits où le niveau d'eau est aussi enregistré.

Pour être certain que les ensembles de données (mesures, simulations) sont bien compatibles entre eux, il faut tenir compte du fait que, si le milieu est très hétérogène, il est préférable de prendre plusieurs mesures de vitesses plutôt qu'une seule vitesse locale. Comme on l'a mentionné auparavant, les zones qui semblent les plus à risques sont celles où la profondeur d'eau est faible. On suggère donc qu'à des profondeurs plus faibles que 60-70 cm, plus d'une vitesse soient prises autour du point que l'on veut caractériser. Ceci pourrait fournir un indice de la variabilité présente sur le terrain, selon le substrat présent et la profondeur d'eau. On suggère un ensemble de cinq ou neuf points (ou plus) situés autour du point central de mesure (sur une surface d'environ 1,5 m X 1,5 m ou plus, selon le choix du chercheur).

Il est aussi important d'effectuer des mesures à plus d'une profondeur, par exemple : $0,2H$, $0,4H$ et $0,8H$ (H étant la profondeur à cet endroit). Ceci permettrait alors de déterminer si l'on est en présence d'un profil d'écoulement de type logarithmique ou non. Ces valeurs assureraient de pouvoir homogénéiser les ensembles de données entre eux et ainsi, de rendre possible la comparaison avec les valeurs simulées par la suite. Par exemple, il serait alors possible de déterminer une vitesse moyenne pour la zone autour du point qui nous intéresse et voir si c'est ce que le logiciel obtient comme résultat. Le tableau 6.1 résume les différentes recommandations proposées pour récolter des données plus aptes à bien valider le modèle hydrodynamique.

Tableau 6.1 : Recommandations permettant d'améliorer la qualité des données récoltées sur le terrain afin de les rendre homogènes avec les données simulées.

Résumé des recommandations
• Plus de points de mesures topographiques dans les zones de faibles profondeurs. • Meilleure délimitation des rives, surtout celles du côté externe des méandres, situées plus près du talweg. • Meilleure caractérisation de la ligne d'eau sur l'ensemble de la rivière en introduisant un plus grand nombre de tiges permettant la mesure du niveau d'eau tout au long du tronçon. • Plus de mesures de vitesses dans les zones de profondeurs < 60-70 cm prises sur une certaine surface autour de l'endroit où le poisson a été observé. • Prise de mesure de vitesses à plus d'une profondeur afin de pouvoir reconstruire la répartition des vitesses dans la colonne d'eau pour savoir si elle est logarithmique ou non.

6.2 Conclusion

Le but premier ce projet était de réaliser une simulation de rivière en condition d'étiage extrême afin de tester la validité du logiciel de modélisation hydrodynamique 2D HYDROSIM. Un but additionnel consistait à déterminer les indices de préférences d'habitat en utilisant une nouvelle méthode, variante de la méthode classique, qui consiste à déterminer la disponibilité des habitats à partir des résultats obtenus avec le modèle numérique de terrain plutôt que de recueillir un plus grande nombre de données sur le terrain qui exigerait des efforts considérables.

Les simulations effectuées aux débits d'étiage donnaient de bons résultats pour ce qui est des profondeurs simulées mais, les vitesses, quant à elles, présentaient un problème important. En fait, lors de l'étude des données calculées, il était difficile de savoir d'où provenait les écarts entre les valeurs de vitesses simulées et celles mesurées. Une révision des méthodes de collecte de données s'imposait donc.

Puisque l'erreur sur les vitesses pouvait provenir d'erreurs sur les profondeurs, celles-ci furent vérifiées. On a donc vu qu'il était facile d'obtenir des écarts parfois considérables sur les profondeurs en cela que lors de la prise de mesures topographiques, la densité de points récoltée devient importante lorsque le lit de la rivière est très irrégulier. Ceci est dû au fait que le logiciel MODELEUR interpole les valeurs de topographie entre les points récoltés et que dans certains cas, des erreurs importantes peuvent subvenir comme sur les rives. De plus, lors de la mesure des profondeurs à l'aide d'une tige graduée, le substrat peut empêcher celle-ci d'atteindre le fond de la rivière ce qui cause alors une erreur de quelques centimètres qui peut être importante sur le calcul d'écoulement de la masse d'eau dans cette zone.

Au niveau des écarts sur les vitesses, les erreurs avaient plusieurs sources possibles : erreur de mesure avec l'appareil, hétérogénéité des vitesses trop importantes pour qu'une seule valeur ponctuelle soit récoltée, possibilité que le profil logarithmique des vitesses ne puisse plus être assumé. Ces problèmes se retrouvant au niveau des mesures, il n'y a pas d'autres solution pour les régler que de s'assurer de récolter des données plus représentatives du milieu.

Pour ce qui est des valeurs simulées par le logiciel, il est possible que les faibles niveaux d'eau aient entraîné une influence importante du substrat sur la masse d'eau, ce que le logiciel ne prend pas en compte d'où des vitesses possédant une gamme réduite par rapport à celles mesurées sur le terrain. Pour tenter de régler ce problème, on a procédé à deux tests. D'abord, on a modifié la discrétisation du maillage hydrodynamique afin d'avoir une

topographie, la plus précise possible. Bien sûr, il est dans ce cas impossible d'aller à un raffinement plus fin que celui des données récoltées sur le terrain. Malheureusement, ce test n'a pas donné les résultats espérés ce qui semblait vouloir dire que la cause des écarts était ailleurs.

Puisqu'on avait émis l'hypothèse que le substrat pouvait créer une hétérogénéité plus importante, on a voulu vérifier si le frottement causé par celui-ci ne pouvait pas être modifié par les conditions extrêmes d'écoulement soit, un très faible niveau d'eau. Dans le logiciel HYDROSIM, le coefficient de Manning qui détermine le frottement causé par le substrat est constant peu importe la profondeur d'eau. Certains chercheurs ont émis l'hypothèse qu'à faible profondeur, il est possible que l'influence du frottement soit plus importante sur la masse d'eau. Ceci laisse donc croire qu'en augmentant le frottement aux faibles profondeurs et en le diminuant aux plus grandes profondeurs, on retrouverait peut-être la gamme des vitesses que l'on a observée sur le terrain. Une nouvelle loi de frottement a donc été établie et appliquée mais malheureusement, sans procurer d'amélioration.

On est donc arrivé à la conclusion que les écarts observés entre les valeurs mesurées et simulées pourraient être liées simultanément aux techniques de caractérisation et de paramétrisation du modèle. Un des moyens de s'assurer de la cause d'erreur serait d'avoir des valeurs mesurées qui, en suivant les recommandations fournies dans ce mémoire, seraient valables et permettraient de vérifier certaines hypothèses mentionnées comme celle d'un écoulement non-logarithmique de la masse d'eau. Il serait aussi nécessaire de revoir la formulation du simulateur HYDROSIM, du moins à l'égard de ses lois de dissipation (frottement, cisaillement) et de leur paramétrisation dans les cours d'eau alluvionnaires à l'étiage. Une meilleure compréhension du terrain, obtenue simultanément à cette révision serait aussi de nature à réconcilier plus facilement ces deux ensembles de données en apparence et paradoxalement hétérogènes.

Un autre objectif de cette recherche était de déterminer les indices de préférences d'habitat du jeune saumon atlantique en utilisant une technique différente de la méthode classique. Ceci a donc été fait malgré les problèmes rencontrés lors de la validation des vitesses simulées. Pour ce faire, on a assumé que les erreurs n'influenceraient pas de façon trop importante les résultats obtenus. Il faut cependant considérer ces résultats comme incertains en ce qui concerne les vitesses. Tant que d'autres études n'auront pas permis de conclure quant à la validité du modèle hydrodynamique dans des conditions d'étiage et donc de son utilisation pour déterminer les disponibilités d'habitats, il est recommandé de poursuivre la détermination des préférences d'habitats à l'aide de mesures directes.

À partir des indices ainsi calculés, des aires pondérées utiles ont été obtenus pour les débits d'étiage observés au cours de l'été 1997. Ces aires démontrent que les poissons sont confinés à de petites zones et que l'optimum d'*APU* n'est pas atteint à des débits en deçà de $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

Suite à ces résultats, de nouvelles possibilités de recherche sont à explorer. D'abord, il pourrait être très intéressant d'étudier l'ambiance hydrodynamique du poisson (c'est-à-dire, les vitesses de courant à l'échelle de son territoire de prédation, soit environ $2\text{-}3 \text{ m}^2$) afin de déterminer l'hétérogénéité des vitesses. Ceci pourrait permettre d'établir un modèle stochastique des vitesses à petites échelles qui pourrait éventuellement être juxtaposé aux vitesses simulées par le logiciel.

De plus, en étudiant la variabilité des vitesses du microhabitat autour du poisson, on pourrait déterminer si certaines constantes existent, c'est-à-dire, constater si le territoire de chasse et de repos du tacon n'est pas plutôt constitué de plusieurs vitesses qui ont tendance à toujours être présentes et qui seraient nécessaires au bon maintien du tacon. Il semble, par exemple, que le territoire doit posséder des vitesses plus faibles qui permettent au poisson de retrouver certaines zones où il peut se reposer et aussi, des vitesses plus élevées qui créent un courant amenant la nourriture sous forme de dérive. Observer une gamme de

vitesse autour du poisson serait alors peut-être une meilleure caractérisation de son habitat préférentiel.

Ces projets, mis en commun avec les capacités de la modélisation bidimensionnelle, sont donc une voie ouverte vers l'avenir. Grâce à l'évolution constante des outils informatiques, les possibilités mathématiques de modélisation 2D par éléments finis offrent la possibilité de toujours améliorer la précision des calculs tout en respectant les lois d'écoulement hydrodynamique au niveau de la conservation de la quantité de mouvement et de la conservation de la masse. En suivant les recommandations fournies dans ce travail, les efforts de caractérisation sur le terrain pourraient être effectués de façon plus efficace et permettraient aussi de vérifier certaines hypothèses quant aux modifications qui se produisent au niveau de l'écoulement lorsque la rivière est en étiage et que les débits y sont très faibles. Cela assurerait alors les chercheurs d'avoir en leur possession des données valables sur la qualité et la quantité des habitats disponibles et ils seraient en mesure de prendre des décisions plus justes lorsque se présente par exemple, des projets de modification d'un cours d'eau ou de construction de barrages.

7. BIBLIOGRAPHIE

Bathurst, J.C. 1988. Velocity profile and high-gradient, boulder-bed channels. *Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics '88*, Research Centre for Water Resources Development, Budapest, Hungary, 29-34.

Bernatchez, L. et M. Giroux. 1991. Guide des poissons d'eau douce du Québec et leur distribution dans l'Est du Canada. *Éditions Broquet Inc.*, 304 p.

Bley, P.W. 1987. Age, growth and mortality of juvenile Atlantic salmon in streams : A review. *U.S. Fish Wildl. Serv., Biol. Rep.*, 87(4). 25 p.

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. 1986. Development and evaluation of habitat suitability criteria for use in instream flow incremental methodology. *Instream Flow Information Paper no. 21, Co-operative Instream Flow Group, U.S. Fish and Wildlife Service*.

Bovee, K. D. 1996. Perspectives on two-dimensional river habitat models :the PHABSIM experience. *Comptes-Rendus du 2^e Symposium International sur l'Hydraulique et les Habitats, INRS-Eau, Québec, Canada, Vol. B, B149-B162*.

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.

Bray, D.I. 1970. Estimating average velocity in gravel bed rivers, *Journal of Hydraulic Div.*, ASCE, Vol. 105 (HY9), p. 1103-1122.

Cunjak, R.A. 1988. Behaviour and microhabitat of young Atlantic salmon (*Salmo salar*) during winter. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, Vol. 45, 2156-2160.

Ferro, V. et G. Baiamonte. 1992. Flow velocity profiles in gravel-bed rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 120, No. 1, 60-80.

Gan, K. et T. McMahon. 1990. Variability of results from the use of PHABSIM in estimating habitat area. *Regulated rivers : Research and Management*, Vol. 5, 233-239.

Ghanem, A., P. Steffler, F. Hicks et S.J. Saltveit. 1994. Two-dimensional finite element flow modeling of physical fish habitat. *Proceeding of the 1st International Association for Hydraulic Research Symposium on Habitat Hydraulics*, Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway. 84-89.

Heggenes, J. 1996. Habitat selection by brown trout (*Salmo trutta*) and young atlantic salmon (*S. salar*) in streams : Static and dynamic hydraulic modelling. *Regulated Rivers : Research & Management*, Vol. 12, 155-169.

Heggenes, J. et S.J. Salveit. 1990. Seasonal and spatial microhabitat selection and segregation in young Atlantic salmon, *Salmo salar* L., in a Norwegian river. *J. Fish. Biol.* Vol. 36, 707-720.

Heniche, M., Y. Secretan, P. Boudreau et M. Leclerc. 1999. A 2-D finite element drying-wetting shallow water model for rivers and estuaries. Accepté dans *Advances in Water Resources*. 35p.

Lafleur, J. 1997. Comparaison de deux approches pour la modélisation des microhabitats. *Mémoire pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)*, Université du Québec, INRS-Eau, 90 p.

Lafleur, J. et M. Leclerc. 1997. The fish habitat modeling with two-dimensional hydraulic tools : a worthwhile approach for setting minimum flow requirements ?. *Instream & Environmental Flow Symposium*, Houston, Texas, 25 p.

Leclerc M., P. Boudreau, J. Bechara, L. Belzile et D. Villeneuve. 1994. Modélisation de la dynamique de l'habitat des jeunes stades de saumon atlantique (*Salmo salar*) de la rivière Ashupmushuan (Québec, Canada). *Bull. Fr. Pêche Piscic.* 332, 11-32.

Leclerc, M., A. Boudreault, J. Bechara et G. Corfa. 1995. Two-dimensional hydrodynamic modeling : A neglected tool in the instream flow incremental methodology., *Transactions of the American Fisheries Society.*, Vol. 124, 645-662.

Marchand, J.P., R.D. Jarrett et L.L. Jones. 1984. Velocity profile, water-surface slope, and bed-material size for selected streams in Colorado., *U.S. Geol. Surv. Open File Rep.*, 84-733, 82 p.

Morin, J., P. Boudreau, Y. Secretan et M. Leclerc. 1999. Pristine Lake Saint-François, St. Lawrence river : Hydrodynamic Simulation & Cumulative Impact. Accepté dans *Journal of Great Lakes Research*.

Nestler J.M., R.T. Milhous et J.B. Layzer. 1989. Instream habitat modeling techniques. *Alternatives in Regulated River Management*, p. 295-315. Gore JA, Petts GE (eds). CRC Press, Boca Raton, Florida.

Orth D.J. et O. Eugene Maughan. 1982. Evaluation of the incremental methodology for recommending instream for fishes. *Transactions of the American Fisheries Society*, Vol. 111, 413-445.

Secretan, Y. et M. Leclerc. 1998. A 2D hydrodynamic GIS and simulation software. *Proceedings of the third international conference on Hydroinformatics 98*. IAHR, Copennagen, Danmark, August 24-26 1998.

Souchon, Y., F. Trocherie, E. Fragnoud et C. Lacombe. 1989. Les modèles numériques des microhabitats des poissons : application et nouveaux développements. *Revue des Sciences de l'Eau*, Vol. 2, no. 4, 807-830.

Stalnaker, C.B. 1994. Evolution of Instream Flow Habitat Modelling. *The Rivers Handbook : Hydrological and Ecological Principles*, 276-286. P. Calow et G. E. Petts. (Eds). Blackwell scientific publications, Oxford. Volume No. 2. 350p.

Tarbet, K. et T.B. Hardy. 1996. Evaluation of one-dimensional and two-dimensional hydraulic modeling in a natural river and implications in instream flow assessment methods, *Comptes-Rendus du 2^e Symposium international de l'AIHR sur l'hydraulique et les habitats - Écohydraulique 2000*, Québec, juin 1996, Vol. B, 395-406.

Waters, B.F. 1976. A methodology for evaluating the effects of different streamflows on salmonid habitat. *Instream Flow Needs J.F. Orsborn et C.H. Allmen Eds*. American Fisheries Society, Western Division, Bethesda, Maryland, 254-266.

Wiberg, P.L. et J.D. Smith. 1991. Velocity distribution and bed roughness in high-gradient streams. *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 5, 825-838.

Wolman, M.G. 1954. A method of sampling coarse river-bed material, *Eos trans. AGU*, 35(6), 951-956.

ANNEXES

Tableau 1 : Caractérisation du substrat pour les 145 zones définies sur le tronçon

Zone #	Bloc métrique (%)	Bloc (%)	Galet (%)	Caillou (%)	Gravier (%)	Sable (%)	d ₁₆ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₈₄ (mm)
1	-	-	50	30	15	5	25	65	90
2	-	-	-	-	60	40	3	10	30
3	-	-	5	50	40	5	13	30	50
4	-	-	10	50	40	-	10	30	65
5	-	-	-	-	-	100	-	-	-
6	-	-	-	-	90	10	-	-	-
7	-	-	10	50	40	-	10	30	65
8	-	-	65	30	-	5	40	75	160
9	-	25	75	-	-	-	-	-	-
10	-	-	50	30	15	5	40	70	140
11	-	-	40	50	10	-	25	55	100
12	-	-	-	50	45	5	10	20	50
13	-	-	40	50	10	-	20	50	100
14	-	-	20	30	50	-	15	30	100
15	-	-	-	-	100	-	-	-	-
16	-	-	60	30	10	-	30	80	130
17	-	-	-	40	50	10	7	20	55
18	-	-	40	50	10	-	10	30	70
19	-	-	40	55	5	-	20	45	90
20	-	-	70	30	-	-	40	85	160
21	-	-	30	50	20	-	30	80	135
22	-	-	70	25	5	-	25	95	120
23	-	-	-	30	60	10	10	25	40
24	-	-	20	30	40	10	20	60	105
25	-	-	30	50	20	-	20	60	110
26	-	-	50	40	10	-	30	80	110
27	-	-	30	50	10	10	20	50	90
28	-	-	30	50	20	-	20	50	120
29	-	-	50	40	10	-	25	90	130
30	-	-	30	60	10	-	35	70	120
31	-	-	40	50	10	-	30	60	110
32	-	-	50	40	10	-	30	75	110
33	-	-	50	45	5	-	45	85	125
34	-	-	40	50	10	-	20	60	90
35	-	-	40	50	10	-	35	60	100
36	-	-	45	50	5	-	30	80	120

Zone #	Bloc métrique (%)	Bloc (%)	Galet (%)	Caillou (%)	Gravier (%)	Sable (%)	d ₁₆ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₈₄ (mm)
37	-	-	50	45	5	-	40	75	150
38	-	-	30	40	25	5	25	50	95
39	-	-	40	50	5	5	30	80	130
40	-	-	65	30	5	-	40	95	140
41	-	-	65	30	5	-	60	90	140
42	-	-	30	45	10	15	30	85	120
43	-	-	55	35	10	-	45	90	140
44	-	-	30	45	10	15	40	85	120
45	-	-	50	35	10	5	30	80	120
46	-	-	40	35	15	10	30	100	150
47	-	-	45	45	5	5	30	90	150
48	-	-	50	30	10	10	30	80	125
49	-	-	40	20	30	10	30	85	150
50	-	-	30	20	25	25	15	60	100
51	-	5	50	35	5	5	50	130	200
52	-	-	30	50	10	10	20	65	115
53	-	-	5	35	55	5	15	55	85
54	-	-	45	35	10	10	35	65	100
55	-	-	35	45	15	5	20	70	120
56	-	-	70	20	-	10	30	95	170
57	-	-	35	40	10	15	30	80	130
58	-	-	55	30	5	10	55	105	170
59	-	-	55	30	5	10	30	90	150
60	-	5	60	30	5	-	30	100	175
61	-	-	55	25	5	15	50	95	130
62	-	-	40	40	5	15	40	85	120
63	-	-	25	50	20	5	25	80	130
64	-	5	60	30	-	5	35	190	350
65	-	10	65	20	-	5	70	130	400
66	-	-	55	40	5	-	34	90	145
67	-	5	45	20	15	15	5	100	300
68	-	-	10	-	40	50	5	10	80
69	-	-	-	-	90	10	7	17	27
70	-	-	20	55	15	10	15	60	125
71	-	-	-	5	35	60	5	17	33
72	-	-	5	40	50	5	6	40	75
73	-	-	-	50	45	5	15	35	50
74	-	-	10	40	50	-	17	55	80

Zone #	Bloc métrique (%)	Bloc (%)	Galet (%)	Caillou (%)	Gravier (%)	Sable (%)	d ₁₆ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₈₄ (mm)
75	-	-	35	40	20	5	20	55	95
76	-	-	25	60	10	5	18	47	90
77	-	-	60	35	5	-	25	90	140
78	-	-	45	30	15	10	27	90	140
79	-	-	20	60	20	-	20	95	155
80	-	-	-	10	90	-	7	20	30
81	-	-	40	55	5	-	22	85	110
82	-	-	40	55	5	-	30	85	130
83	-	-	5	65	10	20	21	60	82
84	-	-	40	40	5	15	20	70	120
85	-	-	40	40	5	15	20	70	120
86	-	-	20	35	5	40	15	50	90
87	-	-	25	40	10	25	20	60	100
88	-	-	25	25	10	40	4	50	100
89	-	-	20	55	25	-	10	55	100
90	-	-	-	5	90	5	5	17	30
91	-	-	-	-	-	100	-	-	-
92	-	-	10	40	45	5	18	35	75
93	-	-	10	35	5	50	1	40	80
94	-	-	20	60	20	-	10	45	100
95	-	-	-	20	80	-	12	30	55
96	-	-	-	60	40	-	15	45	60
97	-	-	-	10	80	10	7	25	45
98	-	-	-	-	85	15	3	11	22
99	-	-	-	50	50	-	15	45	60
100	-	-	5	50	45	-	15	35	75
101	-	-	10	60	30	-	20	48	90
102	-	-	-	25	75	-	7	20	40
103	-	-	-	50	40	10	10	25	48
104	-	-	-	65	35	-	18	30	55
105	-	-	-	-	-	100	-	-	-
106	-	-	-	75	25	-	13	35	50
107	-	-	-	5	95	-	4	12	20
108	-	-	20	70	10	-	20	50	90
109	-	-	-	60	30	10	10	30	50
110	-	-	-	50	50	-	10	30	65
111	-	-	-	-	-	100	-	-	-
112	-	-	-	-	-	100	-	-	-

Zone #	Bloc métrique (%)	Bloc (%)	Galet (%)	Caillou (%)	Gravier (%)	Sable (%)	d ₁₆ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₈₄ (mm)
113	-	-	-	65	30	5	15	37	75
114	-	-	30	50	15	5	28	75	105
115	-	-	10	70	20	-	18	50	85
116	-	-	25	65	10	-	15	55	90
117	-	-	-	-	100	-	-	-	-
118	-	-	5	75	20	-	20	45	70
119	-	-	-	75	25	-	20	43	58
120	-	-	-	70	30	-	18	45	65
121	-	-	-	80	15	5	18	45	60
122	-	-	15	40	45	-	12	40	75
123	-	-	25	60	15	-	22	47	75
124	5	5	50	40	-	-	-	-	-
125	-	5	65	20	10	-	-	-	-
126	-	-	10	50	30	10	18	55	85
127	-	-	-	15	45	40	2	15	33
128	-	-	-	-	-	100	-	-	-
129	-	-	-	45	50	5	17	30	56
130	-	-	-	30	5	65	2	30	67
131	-	-	-	60	40	-	15	33	67
132	-	-	-	45	50	5	15	34	63
133	-	-	35	50	15	-	20	90	130
134	-	-	5	60	30	5	17	50	85
135	-	5	35	15	25	20	-	-	-
136	-	-	25	50	25	-	21	62	86
137	-	-	5	45	45	5	12	35	60
138	-	-	10	45	30	15	22	45	95
139	-	-	20	55	25	-	15	53	95
140	-	-	55	35	10	-	30	70	120
141	-	-	60	35	5	-	40	87	130
142	-	-	25	50	15	10	20	60	100
143	-	-	25	45	15	15	20	62	105
144	-	-	30	35	15	20	15	40	85
145	-	-	40	20	25	15	37	95	130

Tableau 2 : Valeur des variables abiotiques du microhabitat des tacons d'âge 1+ observés sur le terrain

Date	Âge	Substrat			Sable	Profondeur (mm)	Vitesses		Coordonnées	
		d ₁₆ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₈₄ (mm)			(t. /m)	(m/s)	Nord	Est
16-juil-97	1+	13	40	55	5	160	24,0	0,275	1620,336	1608,001
16-juil-97	1+	15	36	50	0	300	48,0	0,547	1612,102	1580,223
16-juil-97	1+	10	25	40	10	180	24,0	0,275	1611,680	1560,030
16-juil-97	1+	15	30	60	10	440	61,0	0,694	1604,658	1523,615
16-juil-97	1+	10	30	60	0	620	74,5	0,848	1606,636	1521,060
16-juil-97	1+	8	25	45	15	280	14,0	0,162	1572,362	1474,718
16-juil-97	1+	10	25	40	15	160	39,5	0,451	1567,285	1487,086
16-juil-97	1+	8	20	80	25	150	41,0	0,468	1557,253	1481,658
16-juil-97	1+	8	20	80	0	250	37,0	0,422	1555,954	1477,281
17-juil-97	1+	20	40	70	40	1220	49,0	0,559	1480,876	1434,428
17-juil-97	1+	12	30	55	40	870	38,5	0,439	1465,705	1431,401
17-juil-97	1+	20	35	50	45	1000	45,5	0,519	1476,163	1435,212
19-juil-97	1+	15	30	70	5	360	12,0	0,139	871,571	1189,431
19-juil-97	1+	10	15	20	70	710	38,0	0,434	911,533	1165,388
19-juil-97	1+	8	25	50	5	390	81,0	0,921	873,766	1198,659
19-juil-97	1+	10	30	55	50	340	93,0	1,058	874,691	1192,538
19-juil-97	1+	20	45	80	5	340	96,0	1,092	880,909	1192,423
19-juil-97	1+	15	35	60	10	440	77,0	0,876	883,196	1191,563
19-juil-97	1+	10	25	50	0	190	7,0	0,082	879,527	1182,540
19-juil-97	1+	25	45	80	0	160	11,5	0,133	880,652	1181,815
19-juil-97	1+	15	30	55	10	200	64,0	0,729	889,663	1186,922
19-juil-97	1+	25	50	70	0	270	46,5	0,530	924,347	1190,611
21-juil-97	1+	8	15	26	25	320	8,0	0,094	930,311	1169,253
21-juil-97	1+	12	28	45	5	390	90,0	1,024	937,253	1169,544
21-juil-97	1+	6	12	21	10	470	55,0	0,627	942,163	1169,883
21-juil-97	1+	6	12	25	30	340	39,0	0,445	944,097	1170,512
21-juil-97	1+	10	35	54	0	220	87,0	0,990	944,658	1174,281
21-juil-97	1+	10	35	70	0	300	106,0	1,205	954,560	1189,038
21-juil-97	1+	7	40	75	5	280	58,5	0,666	925,286	1191,256
21-juil-97	1+	12	39	67	0	310	51,0	0,581	924,843	1192,359
21-juil-97	1+	15	40	75	0	260	48,0	0,547	929,260	1193,050
21-juil-97	1+	8	24	45	5	490	32,5	0,371	933,397	1193,631
21-juil-97	1+	10	26	55	5	190	64,0	0,729	943,765	1199,769

Date	Âge	Substrat			Sable (%)	Profondeur (mm)	Vitesses		Coordonnées	
		d ₁₆ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₈₄ (mm)			(t. /m)	(m/s)	Nord	Est
21-juil-97	1+	10	35	70	5	290	50,0	0,570	945,942	1201,238
21-juil-97	1+	15	45	72	0	340	65,5	0,746	950,084	1209,391
21-juil-97	1+	18	55	80	5	200	49,0	0,559	948,908	1212,503
21-juil-97	1+	10	45	70	0	380	52,0	0,593	951,530	1212,500
21-juil-97	1+	12	36	67	5	350	52,0	0,593	956,077	1209,550
21-juil-97	1+	12	30	75	0	550	54,0	0,615	954,693	1212,774
22-juil-97	1+	17	35	70	0	350	72,0	0,819	-	-
22-juil-97	1+	10	30	65	15	160	66,0	0,751	-	-
22-juil-97	1+	12	46	70	5	360	56,0	0,638	-	-
22-juil-97	1+	10	30	55	5	270	53,0	0,604	-	-
22-juil-97	1+	17	50	80	5	460	54,5	0,621	-	-
22-juil-97	1+	18	60	85	5	500	39,0	0,445	-	-
22-juil-97	1+	20	55	80	5	640	32,3	0,369	-	-
22-juil-97	1+	10	40	90	10	700	39,5	0,451	-	-
22-juil-97	1+	15	50	80	5	410	30,5	0,349	-	-
22-juil-97	1+	20	65	115	5	470	13,5	0,156	-	-
23-juil-97	1+	17	45	68	10	130	0,5	0,008	1046,172	1168,141
23-juil-97	1+	15	65	80	0	580	22,5	0,258	1080,632	1141,684
23-juil-97	1+	14	45	75	5	1160	33,5	0,383	1080,700	1133,902
23-juil-97	1+	21	52	85	5	1110	36,0	0,411	1083,532	1116,035
23-juil-97	1+	12	35	75	20	1160	27,5	0,315	1080,923	1094,852
23-juil-97	1+	18	36	70	0	430	17,8	0,204	1085,292	1128,934
23-juil-97	1+	16	42	70	25	440	9,0	0,105	1072,590	1099,078
23-juil-97	1+	25	60	90	50	590	17,5	0,201	1073,093	1088,296
23-juil-97	1+	20	45	70	10	420	19,0	0,218	1078,079	1068,297
24-juil-97	1+	15	35	60	20	960	35,5	0,405	1077,695	1076,708
24-juil-97	1+	11	27	56	35	560	24,5	0,281	1066,104	1053,322
24-juil-97	1+	16	46	63	10	390	28,0	0,320	1068,597	1046,747
24-juil-97	1+	14	28	50	25	420	24,0	0,275	1054,626	1041,255
24-juil-97	1+	12	32	58	35	220	41,8	0,476	1043,888	1025,197
24-juil-97	1+	17	45	60	20	510	18,0	0,207	1045,899	1022,260
24-juil-97	1+	10	22	45	30	470	17,0	0,196	1036,300	1010,215
24-juil-97	1+	15	29	56	30	600	15,5	0,179	1041,528	998,335
24-juil-97	1+	20	40	70	35	880	19,3	0,221	1036,265	999,909
24-juil-97	1+	13	35	63	10	400	26,3	0,301	1028,590	1003,924
01-août-97	1+	15	60	80	0	580	25,3	0,289	1608,096	1603,042
01-août-97	1+	25	50	70	0	330	62,5	0,712	1618,208	1597,455

Date	Âge	Substrat			Sable	Profondeur (mm)	Vitesses		Coordonnées	
		d ₁₆ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₈₄ (mm)			(t./m)	(m/s)	Nord	Est
01-août-97	1+	18	38	70	0	410	51,5	0,587	1617,487	1580,177
01-août-97	1+	17	52	73	5	500	44,8	0,510	1621,280	1575,796
01-août-97	1+	15	50	75	5	450	38,3	0,437	1621,781	1574,088
01-août-97	1+	20	70	100	0	480	51,5	0,587	1615,377	1538,789
01-août-97	1+	30	55	110	0	570	53,5	0,610	1611,910	1530,518
01-août-97	1+	15	35	70	20	540	51,0	0,581	1597,008	1503,466
01-août-97	1+	30	55	90	0	500	56,5	0,644	1620,199	1550,359
01-août-97	1+	35	85	120	0	590	64,0	0,729	1609,239	1524,251
03-août-97	1+	22	40	70	5	520	90,0	1,024	1593,134	1508,555
03-août-97	1+	22	40	70	0	180	17,5	0,201	1588,560	1507,103
03-août-97	1+	17	35	65	15	340	19,3	0,221	1583,205	1496,119
03-août-97	1+	17	35	65	20	340	25,3	0,289	1580,197	1492,088
03-août-97	1+	20	40	70	5	290	100,0	1,137	1574,528	1488,769
03-août-97	1+	25	40	70	5	190	21,8	0,249	1579,313	1500,766
03-août-97	1+	22	40	70	20	290	45,3	0,516	1571,054	1496,727
03-août-97	1+	20	45	75	10	220	18,5	0,213	1569,978	1495,264
03-août-97	1+	20	38	70	5	220	13,8	0,159	1570,250	1493,750
03-août-97	1+	20	40	70	5	190	15,0	0,173	1568,905	1493,736
04-août-97	1+	15	35	58	0	420	76,0	0,865	1550,626	1459,169
04-août-97	1+	20	45	60	5	680	61,0	0,695	1529,860	1451,724
04-août-97	1+	20	40	65	0	690	43,5	0,496	1527,411	1449,498
04-août-97	1+	18	39	60	35	480	34,0	0,388	1515,246	1454,532
04-août-97	1+	15	35	55	15	410	17,3	0,198	1500,662	1451,036
04-août-97	1+	15	30	55	20	600	28,0	0,320	1500,553	1448,243
05-août-97	1+	18	52	70	5	260	14,5	0,167	858,451	1197,326
05-août-97	1+	18	47	65	5	390	62,3	0,709	865,000	1197,909
05-août-97	1+	17	43	63	5	400	48,5	0,553	865,834	1190,551
05-août-97	1+	20	49	75	10	320	39,0	0,445	868,930	1191,162
05-août-97	1+	15	37	60	5	280	1,5	0,020	870,095	1187,999
05-août-97	1+	25	48	70	0	430	9,0	0,105	869,860	1185,183
05-août-97	1+	16	40	75	5	350	82,0	0,933	873,558	1191,745
05-août-97	1+	20	55	80	0	220	34,5	0,394	878,489	1184,345
05-août-97	1+	25	55	80	10	370	46,0	0,525	882,927	1182,948
05-août-97	1+	20	55	75	15	360	66,0	0,751	896,980	1182,692
05-août-97	1+	20	55	85	15	420	74,0	0,842	899,351	1180,615
05-août-97	1+	15	54	110	5	330	28,0	0,320	905,250	1175,921
05-août-97	1+	30	70	130	30	250	19,5	0,224	906,689	1182,966

Date	Âge	Substrat			Sable	Profondeur (mm)	Vitesses		Coordonnées	
		d ₁₆ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₈₄ (mm)			(t. /m)	(m/s)	Nord	Est
05-août-97	1+	18	54	115	0	380	31,5	0,360	918,205	1181,918
05-août-97	1+	20	45	65	10	240	9,0	0,105	883,642	1180,541
06-août-97	1+	13	24	47	40	580	33,3	0,380	1428,191	1430,413
06-août-97	1+	20	38	70	5	500	21,3	0,244	1431,771	1420,997
06-août-97	1+	23	43	77	40	550	32,0	0,366	1421,516	1420,709
06-août-97	1+	12	28	53	25	240	14,8	0,170	1424,559	1435,765
06-août-97	1+	18	31	62	30	270	3,8	0,045	1431,252	1436,365
06-août-97	1+	10	14	35	30	290	13,5	0,156	1411,807	1437,693
06-août-97	1+	17	34	51	30	320	12,5	0,145	1414,688	1436,489
06-août-97	1+	15	25	39	40	760	32,3	0,369	1411,570	1425,527
08-août-97	1+	17	34	85	50	360	46,5	0,524	881,504	1173,863
08-août-97	1+	14	36	70	10	250	27,5	0,313	882,362	1174,195
08-août-97	1+	10	26	52	25	560	50,0	0,563	901,274	1169,233
08-août-97	1+	11	25	44	20	430	47,5	0,535	906,387	1172,067
08-août-97	1+	11	25	43	10	470	43,5	0,491	902,747	1170,369
08-août-97	1+	10	16	30	25	670	43,5	0,491	922,047	1165,716
08-août-97	1+	11	18	35	15	390	50,0	0,563	927,157	1168,109
08-août-97	1+	11	18	33	15	420	36,5	0,413	925,624	1168,126
08-août-97	1+	14	22	37	15	300	38,5	0,439	933,440	1171,163
08-août-97	1+	12	43	105	5	380	54,5	0,621	932,153	1192,547
08-août-97	1+	11	34	73	20	400	4,0	0,048	937,976	1193,521
08-août-97	1+	8	35	91	80	500	8,8	0,102	939,645	1195,890
08-août-97	1+	9	24	48	15	1100	70,0	0,797	937,124	1198,096
08-août-97	1+	14	33	95	5	270	70,0	0,797	939,406	1201,970
08-août-97	1+	18	40	65	0	200	70,0	0,785	940,135	1176,880
08-août-97	1+	12	26	66	5	360	88,8	0,994	945,878	1177,335
08-août-97	1+	18	42	95	0	460	73,5	0,824	952,150	1187,573
08-août-97	1+	18	42	95	0	370	96,5	1,080	952,343	1188,974
08-août-97	1+	20	55	110	0	480	83,0	0,930	957,837	1193,818
09-août-97	1+	20	52	115	5	580	37,8	0,427	1047,910	1200,644
09-août-97	1+	20	36	61	0	360	42,8	0,488	962,390	1199,654
09-août-97	1+	32	56	97	5	510	73,3	0,834	967,074	1217,286
09-août-97	1+	17	65	90	0	210	41,5	0,473	969,264	1200,161
09-août-97	1+	17	69	95	0	290	50,0	0,570	970,893	1199,173
09-août-97	1+	15	39	85	5	300	37,0	0,418	986,149	1213,154
09-août-97	1+	15	37	80	10	290	48,0	0,541	987,226	1211,238
09-août-97	1+	17	50	90	5	260	65,5	0,746	987,195	1204,614

Date	Âge	Substrat			Sable	Profondeur (mm)	Vitesses		Coordonnées	
		d ₁₆ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₈₄ (mm)			(t./m)	(m/s)	Nord	Est
09-août-97	1+	15	42	80	10	250	63,5	0,723	990,014	1205,698
09-août-97	1+	17	32	85	10	320	53,0	0,596	992,496	1215,319
09-août-97	1+	15	32	85	5	550	35,8	0,404	991,844	1217,266
09-août-97	1+	18	30	85	10	430	39,3	0,443	1003,039	1216,138
09-août-97	1+	14	37	95	5	240	37,3	0,421	1003,399	1211,811
09-août-97	1+	15	40	100	0	280	39,0	0,445	1002,894	1206,564
09-août-97	1+	15	35	85	0	280	13,5	0,156	1000,953	1202,426
09-août-97	1+	18	45	100	5	1000	36,5	0,413	1044,126	1198,128
09-août-97	1+	20	50	120	5	410	35,5	0,402	1047,417	1201,813
09-août-97	1+	22	55	100	0	1100	38,0	0,429	1057,829	1188,870
09-août-97	1+	21	53	97	5	800	37,5	0,428	1041,283	1200,527
09-août-97	1+	19	62	85	5	30	55,0	0,627	1033,419	1209,914
09-août-97	1+	19	62	85	5	580	46,8	0,533	1032,231	1208,960
09-août-97	1+	35	68	125	0	550	49,5	0,564	1017,507	1211,612
09-août-97	1+	12	60	102	0	260	50,5	0,576	1007,449	1207,062
10-août-97	1+	47	68	115	5	720	26,0	0,298	1055,516	1189,609
10-août-97	1+	21	55	82	0	880	42,0	0,479	1063,178	1175,343
10-août-97	1+	19	61	105	0	450	26,8	0,306	1066,717	1175,377
10-août-97	1+	24	53	87	0	970	30,0	0,343	1066,040	1172,037
10-août-97	1+	32	70	100	0	810	32,0	0,366	1071,421	1164,155
10-août-97	1+	15	45	83	15	1000	33,3	0,377	1084,154	1123,473
10-août-97	1+	13	40	88	10	1010	29,0	0,329	1084,040	1121,284
10-août-97	1+	14	40	90	10	1000	35,8	0,404	1083,993	1107,202
10-août-97	1+	10	36	71	25	820	17,0	0,196	1077,591	1101,644
10-août-97	1+	20	36	92	20	800	27,5	0,315	1076,868	1085,971
10-août-97	1+	25	62	105	15	1100	34,0	0,388	1081,152	1090,657
10-août-97	1+	23	42	105	10	360	14,5	0,167	1068,585	1082,276
10-août-97	1+	22	68	110	10	400	26,0	0,298	1065,434	1072,250
10-août-97	1+	10	30	81	30	600	28,0	0,318	1068,612	1060,325
10-août-97	1+	10	30	80	35	610	31,0	0,352	1070,231	1058,869
10-août-97	1+	12	30	85	20	500	29,5	0,335	1065,762	1064,199
10-août-97	1+	14	40	90	20	510	25,5	0,291	1063,272	1063,949
10-août-97	1+	12	29	75	40	340	24,0	0,274	1061,251	1042,716
10-août-97	1+	14	35	80	15	430	36,5	0,413	1064,484	1038,025
10-août-97	1+	12	38	72	20	390	38,0	0,429	1060,313	1038,813
10-août-97	1+	11	27	62	30	400	36,0	0,407	1052,414	1033,988
10-août-97	1+	20	40	70	5	280	26,0	0,296	1058,548	1023,504

Date	Âge	Substrat			Sable	Profondeur (mm)	Vitesses		Coordonnées	
		d ₁₆ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₈₄ (mm)			(t. /m)	(m/s)	Nord	Est
10-août-97	1+	16	40	72	15	320	34,0	0,385	1045,513	1025,750
11-août-97	1+	10	21	56	30	530	29,0	0,332	1046,831	1023,482
11-août-97	1+	12	32	55	50	600	31,5	0,360	1048,622	1016,178
11-août-97	1+	15	38	70	30	560	19,5	0,224	1033,666	1000,025
11-août-97	1+	12	25	60	20	410	22,8	0,261	1039,280	1014,592

Tableau 3 : Valeur des variables abiotiques du microhabitat des tacons d'âge 2+ observés sur le terrain

Date	Âge	Substrat			Sable	Profondeur (mm)	Vitesses		Coordonnées	
		d ₁₆ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₈₄ (mm)			(t. /m)	(m/s)	Nord	Est
16-juil-97	2+	25	50	75	0	520	87,0	0,990	1618,822	1584,489
16-juil-97	2+	10	25	45	0	480	61,0	0,695	1618,829	1561,135
16-juil-97	2+	10	30	60	0	230	95,0	1,080	1606,232	1592,744
16-juil-97	2+	25	60	85	0	220	53,5	0,610	1606,346	1588,106
16-juil-97	2+	15	45	65	0	180	12,0	0,139	1605,651	1586,490
16-juil-97	2+	10	50	80	0	200	40,5	0,462	1607,058	1584,470
16-juil-97	2+	10	35	50	5	460	32,0	0,366	1615,999	1563,558
16-juil-97	2+	15	50	80	15	380	48,0	0,547	1599,426	1517,247
16-juil-97	2+	10	50	80	10	600	90,0	1,024	1597,662	1505,011
16-juil-97	2+	20	40	70	15	740	76,0	0,865	1589,777	1500,947
16-juil-97	2+	15	30	60	25	670	24,5	0,281	1583,607	1492,962
16-juil-97	2+	10	25	40	15	160	35,0	0,400	1566,566	1486,448
16-juil-97	2+	15	30	50	15	200	31,0	0,354	1554,572	1472,913
16-juil-97	2+	20	45	70	15	280	33,0	0,377	1551,393	1464,043
17-juil-97	2+	26	60	90	0	880	26,5	0,303	1497,970	1435,875
19-juil-97	2+	15	45	80	5	220	9,5	0,111	859,057	1196,625
19-juil-97	2+	15	35	70	0	440	63,0	0,717	866,353	1196,132
19-juil-97	2+	20	50	90	0	400	53,0	0,604	-	-
19-juil-97	2+	10	45	75	5	480	58,0	0,661	872,073	1191,250
19-juil-97	2+	10	40	75	0	480	60,5	0,689	865,784	1189,568
19-juil-97	2+	15	25	65	0	240	45,0	0,513	863,655	1188,959
19-juil-97	2+	10	35	60	5	470	45,0	0,513	867,409	1188,108

Date	Âge	Substrat			Sable	Profondeur (mm)	Vitesses		Coordonnées	
		d ₁₆ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₈₄ (mm)			(t. /m)	(m/s)	Nord	Est
19-juil-97	2+	15	45	80	0	280	9,3	0,108	870,940	1188,563
19-juil-97	2+	22	45	70	0	540	54,0	0,615	870,896	1182,613
19-juil-97	2+	10	30	50	10	370	57,0	0,649	898,027	1170,836
19-juil-97	2+	10	15	20	60	880	50,0	0,570	911,548	1164,681
19-juil-97	2+	10	35	65	0	260	40,0	0,456	883,458	1172,445
19-juil-97	2+	25	55	80	0	430	82,0	0,933	900,256	1179,958
19-juil-97	2+	40	70	90	0	360	89,5	1,018	904,001	1179,263
19-juil-97	2+	20	55	70	10	400	65,0	0,740	906,496	1180,604
19-juil-97	2+	10	30	55	0	370	68,5	0,780	918,502	1179,767
19-juil-97	2+	15	40	60	5	280	62,5	0,712	921,671	1190,113
21-juil-97	2+	9	32	54	5	680	62,5	0,712	924,104	1163,450
21-juil-97	2+	5	15	30	40	280	38,0	0,434	932,957	1170,665
21-juil-97	2+	10	28	56	5	280	47,0	0,536	947,185	1183,390
21-juil-97	2+	17	36	65	0	500	89,0	1,012	958,663	1193,550
21-juil-97	2+	8	30	50	5	430	28,0	0,320	933,558	1192,496
21-juil-97	2+	10	40	70	5	850	43,0	0,490	932,666	1197,692
21-juil-97	2+	10	40	60	5	950	16,5	0,190	932,781	1198,784
21-juil-97	2+	12	40	80	0	450	68,0	0,774	930,178	1194,314
21-juil-97	2+	20	43	60	0	210	37,5	0,428	961,283	1199,598
21-juil-97	2+	10	30	60	5	300	66,0	0,751	967,112	1198,334
22-juil-97	2+	12	40	70	5	190	59,0	0,672	-	-
22-juil-97	2+	12	30	55	5	210	40,0	0,456	-	-
22-juil-97	2+	14	38	58	5	220	69,0	0,785	-	-
22-juil-97	2+	15	65	95	0	210	31,0	0,354	-	-
22-juil-97	2+	20	60	85	5	520	41,0	0,468	-	-
22-juil-97	2+	13	55	90	10	490	36,0	0,411	-	-
23-juil-97	2+	14	55	75	5	1230	29,5	0,337	1077,253	1138,701
23-juil-97	2+	17	50	90	5	1000	34,5	0,394	1080,205	1137,312
23-juil-97	2+	15	36	60	35	-	-	-	1076,413	1108,663
23-juil-97	2+	18	45	65	15	1140	27,5	0,315	1081,191	1096,243
23-juil-97	2+	30	65	90	0	640	28,0	0,320	1084,436	1100,337
23-juil-97	2+	15	32	75	30	490	27,5	0,315	1069,592	1066,312
23-juil-97	2+	10	28	60	30	520	25,0	0,286	1067,046	1065,731
23-juil-97	2+	15	46	58	35	570	30,5	0,349	1068,281	1063,740
24-juil-97	2+	12	44	58	45	640	24,8	0,284	1072,108	1070,751
24-juil-97	2+	13	35	62	30	490	28,0	0,320	1068,351	1068,365
24-juil-97	2+	15	36	68	25	410	28,8	0,329	1062,395	1042,073

Date	Âge	Substrat			Sable (%)	Profondeur (mm)	Vitesses		Coordonnées	
		d ₁₆ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₈₄ (mm)			(t. /m)	(m/s)	Nord	Est
24-juil-97	2+	12	24	62	40	440	18,0	0,207	1047,186	1036,780
24-juil-97	2+	16	40	57	35	390	47,5	0,542	1050,583	1029,914
24-juil-97	2+	12	32	58	35	490	45,0	0,513	1052,591	1022,937
24-juil-97	2+	14	27	61	35	400	31,3	0,357	1063,104	1059,912
24-juil-97	2+	17	33	50	15	880	33,3	0,380	1043,308	1008,750
24-juil-97	2+	12	29	56	40	680	33,0	0,377	1042,262	1001,518
24-juil-97	2+	25	55	70	25	380	15,8	0,181	1043,224	998,586
01-août-97	2+	70	150	300	0	1100	14,0	0,162	1632,988	1626,908
01-août-97	2+	25	90	130	5	570	41,0	0,468	1608,277	1614,351
01-août-97	2+	18	50	79	0	440	45,0	0,513	1616,168	1583,459
01-août-97	2+	20	55	82	0	560	66,5	0,757	1618,978	1581,180
01-août-97	2+	20	55	84	5	510	37,8	0,431	1621,215	1579,268
01-août-97	2+	20	57	83	0	510	42,3	0,482	1621,326	1577,315
01-août-97	2+	18	37	65	0	600	48,8	0,556	1617,504	1569,599
01-août-97	2+	20	45	90	5	720	52,0	0,593	1618,870	1569,511
01-août-97	2+	25	60	80	0	570	40,0	0,456	1618,407	1562,588
01-août-97	2+	25	60	80	0	660	43,8	0,499	1618,959	1562,310
01-août-97	2+	45	80	130	0	640	71,0	0,808	1618,838	1541,394
01-août-97	2+	30	55	110	0	560	57,3	0,652	1613,081	1529,896
01-août-97	2+	35	85	120	0	590	64,0	0,729	1609,239	1524,051
01-août-97	2+	24	58	92	0	620	54,0	0,615	1606,138	1515,490
01-août-97	2+	18	60	95	5	610	60,0	0,683	1601,227	1508,934
03-août-97	2+	20	40	70	15	370	46,0	0,525	1586,905	1502,032
03-août-97	2+	17	35	65	15	430	36,8	0,420	1584,365	1497,586
03-août-97	2+	20	52	80	0	300	72,0	0,819	1573,163	1486,971
04-août-97	2+	15	30	55	30	600	55,0	0,627	1539,218	1457,931
04-août-97	2+	15	35	55	15	420	24,8	0,284	1499,671	1451,263
05-août-97	2+	20	48	65	0	350	44,0	0,502	866,275	1194,497
05-août-97	2+	20	42	74	0	490	70,0	0,797	866,628	1187,216
05-août-97	2+	22	45	72	0	550	45,5	0,519	868,443	1186,146
05-août-97	2+	25	50	70	5	550	44,0	0,502	869,564	1184,534
05-août-97	2+	20	45	72	0	460	47,0	0,536	872,649	1180,905
05-août-97	2+	20	45	65	10	240	9,0	0,105	883,342	1180,741
05-août-97	2+	16	38	78	15	420	48,0	0,547	890,534	1179,094
05-août-97	2+	11	35	80	40	720	21,0	0,241	904,996	1167,317
05-août-97	2+	21	50	120	0	280	42,0	0,479	907,143	1177,207
06-août-97	2+	8	41	87	5	1040	43,5	0,496	1471,570	1429,094

Date	Âge	Substrat			Sable	Profondeur (mm)	Vitesses		Coordonnées	
		d ₁₆ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₈₄ (mm)			(t. /m)	(m/s)	Nord	Est
06-août-97	2+	12	33	91	5	320	22,5	0,258	1462,138	1424,033
06-août-97	2+	14	38	55	15	380	14,3	0,164	1424,397	1434,215
08-août-97	2+	12	34	70	10	460	45,8	0,516	896,197	1167,628
08-août-97	2+	9	14	32	20	760	51,5	0,580	904,768	1166,849
08-août-97	2+	15	31	47	15	980	57,0	0,641	907,881	1164,977
08-août-97	2+	10	24	33	30	500	64,8	0,727	940,717	1169,956
08-août-97	2+	12	38	75	5	460	104,0	1,163	957,010	1191,527
08-août-97	2+	11	33	57	5	300	68,0	0,763	960,846	1192,948
09-août-97	2+	14	34	71	0	180	46,0	0,525	963,106	1194,356
09-août-97	2+	32	56	97	5	530	17,0	0,196	958,293	1216,145
09-août-97	2+	19	29	50	0	260	77,8	0,885	978,148	1215,310
09-août-97	2+	17	32	80	5	240	49,5	0,564	983,195	1207,928
09-août-97	2+	17	50	92	5	180	54,5	0,621	991,092	1204,978
09-août-97	2+	15	35	85	5	280	32,0	0,363	992,040	1212,504
09-août-97	2+	15	40	90	5	280	59,8	0,680	1002,763	1207,278
09-août-97	2+	18	45	100	5	1050	37,8	0,427	1045,196	1197,901
09-août-97	2+	20	52	115	5	580	37,8	0,427	1047,910	1200,644
09-août-97	2+	21	53	73	5	850	42,0	0,479	1042,313	1200,806
09-août-97	2+	14	61	110	0	480	63,0	0,717	1016,658	1215,692
09-août-97	2+	12	60	102	0	270	37,8	0,431	1005,680	1205,936
10-août-97	2+	9	35	115	40	1140	29,0	0,329	1082,747	1109,013
10-août-97	2+	28	52	88	0	690	25,0	0,286	1084,329	1099,752
10-août-97	2+	30	52	115	25	680	22,0	0,252	1076,794	1092,196
10-août-97	2+	21	40	100	10	920	32,0	0,366	1077,107	1076,096
10-août-97	2+	30	55	125	5	650	27,5	0,315	1078,887	1072,466
10-août-97	2+	14	35	85	10	420	33,0	0,374	1066,210	1040,302
10-août-97	2+	14	37	65	25	430	33,5	0,379	1053,904	1024,199

**Tableau 4 : Comparaison des données mesurées sur le terrain et simulées par
HYDROSIM pour un débit de 2,6 m³/s**

Coordonnées		Profondeurs		Vitesse		Écarts	
Nord	Est	Mesurées	Simulées	Mesurées	Simulées	Profondeur	Vitesses
		(m)	(m)	(m/s)	(m/s)	(m)	(m/s)
1040.642	1173.920	0.080	0.026	0.025	0.085	0.054	-0.060
1040.870	1175.367	0.070	0.077	0.049	0.140	-0.007	-0.092
1042.523	1026.910	0.280	0.351	0.182	0.303	-0.071	-0.121
1043.207	1172.038	0.140	0.061	0.008	0.091	0.079	-0.082
1043.819	1170.964	0.140	-0.012	0.008	0.068	0.152	-0.059
1044.952	1039.836	0.480	0.463	0.202	0.158	0.017	0.044
1045.513	1025.750	0.320	0.479	0.385	0.344	-0.159	0.041
1046.172	1168.141	0.130	-0.034	0.008	0.059	0.164	-0.051
1047.406	1035.482	0.400	0.483	0.227	0.289	-0.083	-0.063
1048.444	1169.376	0.080	0.100	0.026	0.176	-0.020	-0.149
1048.947	1176.195	0.180	0.116	0.031	0.313	0.064	-0.281
1050.124	1161.132	0.180	0.056	0.043	0.050	0.124	-0.007
1050.317	1040.659	0.440	0.474	0.232	0.300	-0.034	-0.068
1051.136	1174.034	0.170	0.132	0.034	0.293	0.038	-0.259
1051.478	1175.920	0.290	0.216	0.111	0.308	0.074	-0.197
1051.503	1159.540	0.160	0.128	0.068	0.060	0.032	0.008
1051.758	1162.043	0.120	0.156	0.060	0.118	-0.036	-0.058
1052.414	1033.988	0.400	0.461	0.407	0.362	-0.061	0.046
1052.732	1170.125	0.150	0.132	0.040	0.264	0.018	-0.224
1053.603	1182.856	0.800	0.535	0.400	0.313	0.265	0.086
1053.736	1056.964	0.430	0.235	0.168	0.283	0.195	-0.114
1053.904	1024.199	0.430	0.383	0.379	0.330	0.047	0.050
1053.977	1177.094	0.440	0.404	0.275	0.311	0.036	-0.036
1054.694	1050.634	0.480	0.498	0.399	0.331	-0.018	0.068
1055.516	1189.609	0.720	0.882	0.298	0.250	-0.162	0.048
1055.897	1184.580	0.950	0.755	0.349	0.290	0.195	0.059
1056.648	1166.840	0.210	0.210	0.057	0.293	0.000	-0.237
1056.700	1053.978	0.460	0.496	0.363	0.347	-0.036	0.015
1056.857	1164.160	0.150	0.187	0.096	0.285	-0.037	-0.189
1057.032	1148.871	0.140	0.044	0.008	0.062	0.096	-0.053
1057.467	1175.960	0.690	0.515	0.366	0.304	0.175	0.061
1057.508	1150.118	0.220	0.108	0.018	0.091	0.112	-0.073
1058.208	1066.397	0.320	0.285	0.088	0.304	0.035	-0.217

Coordonnées		Profondeurs		Vitesse		Écarts	
Nord	Est	Mesurées	Simulées	Mesurées	Simulées	Profondeur	Vitesses
		(m)	(m)	(m/s)	(m/s)	(m)	(m/s)
1058.508	1151.118	0.230	0.178	0.029	0.132	0.052	-0.102
1058.548	1023.504	0.280	0.169	0.296	0.180	0.111	0.116
1059.508	1152.118	0.240	0.180	0.040	0.178	0.060	-0.138
1060.313	1038.813	0.390	0.508	0.429	0.280	-0.118	0.150
1061.251	1042.716	0.340	0.540	0.274	0.289	-0.200	-0.015
1061.757	1166.006	0.520	0.501	0.326	0.324	0.019	0.002
1061.855	1044.101	0.430	0.549	0.249	0.286	-0.119	-0.037
1063.178	1175.343	0.880	0.850	0.479	0.283	0.030	0.196
1063.272	1063.949	0.510	0.465	0.291	0.365	0.045	-0.075
1064.077	1168.161	0.680	0.688	0.405	0.307	-0.008	0.098
1064.173	1179.131	0.540	0.848	0.318	0.264	-0.308	0.053
1064.484	1038.025	0.430	0.515	0.413	0.146	-0.085	0.267
1064.543	1178.391	0.540	0.850	0.318	0.265	-0.310	0.053
1064.840	1152.148	0.330	0.300	0.235	0.285	0.030	-0.050
1064.932	1164.895	0.650	0.626	0.286	0.319	0.024	-0.033
1065.434	1072.250	0.400	0.420	0.298	0.344	-0.020	-0.047
1065.701	1139.559	0.110	0.057	0.025	0.162	0.053	-0.137
1065.762	1064.199	0.500	0.501	0.335	0.348	-0.001	-0.013
1066.040	1172.037	0.970	0.904	0.343	0.274	0.066	0.070
1066.210	1040.302	0.420	0.460	0.374	0.103	-0.040	0.271
1066.560	1139.027	0.140	0.131	0.021	0.200	0.009	-0.179
1066.717	1175.377	0.450	0.811	0.306	0.254	-0.361	0.053
1067.011	1163.039	0.730	0.687	0.394	0.319	0.043	0.075
1067.046	1065.731	0.520	0.542	0.286	0.338	-0.022	-0.052
1067.662	1134.135	0.150	0.159	0.008	0.218	-0.009	-0.209
1067.749	1156.900	0.620	0.619	0.383	0.324	0.001	0.059
1067.834	1068.109	0.480	0.551	0.309	0.335	-0.071	-0.026
1068.119	1054.756	0.620	0.574	0.285	0.254	0.046	0.031
1068.129	1138.981	0.300	0.292	0.088	0.241	0.008	-0.154
1068.281	1063.740	0.570	0.595	0.349	0.317	-0.025	0.032
1068.585	1082.276	0.360	0.400	0.167	0.297	-0.040	-0.130
1068.603	1132.498	0.200	0.237	0.023	0.247	-0.037	-0.224
1068.612	1060.325	0.600	0.589	0.318	0.293	0.011	0.025
1068.672	1126.711	0.110	0.174	0.008	0.254	-0.064	-0.245
1068.943	1148.982	0.580	0.557	0.275	0.291	0.023	-0.016
1069.242	1119.057	0.070	0.140	0.008	0.281	-0.070	-0.272
1069.592	1066.312	0.490	0.631	0.315	0.308	-0.141	0.007

Coordonnées		Profondeurs		Vitesse		Écart	
Nord	Est	Mesurées	Simulées	Mesurées	Simulées	Profondeur	Vitesses
		(m)	(m)	(m/s)	(m/s)	(m)	(m/s)
1069.851	1161.753	0.800	0.725	0.479	0.311	0.075	0.168
1070.230	1162.428	0.760	0.709	0.422	0.304	0.051	0.119
1070.231	1058.869	0.610	0.597	0.352	0.248	0.013	0.104
1071.421	1164.155	0.810	0.721	0.366	0.278	0.089	0.088
1071.542	1084.711	0.960	0.554	0.196	0.282	0.406	-0.087
1071.594	1111.984	0.350	0.309	0.021	0.315	0.041	-0.294
1071.928	1069.466	0.600	0.681	0.366	0.280	-0.081	0.086
1072.421	1165.155	0.811	0.757	0.377	0.254	0.054	0.123
1072.590	1099.078	0.440	0.426	0.105	0.266	0.014	-0.161
1073.011	1071.894	0.680	0.720	0.320	0.272	-0.040	0.048
1073.093	1088.296	0.590	0.610	0.201	0.272	-0.020	-0.071
1073.114	1136.171	0.670	0.708	0.187	0.279	-0.038	-0.091
1073.245	1141.673	0.880	0.883	0.035	0.280	-0.003	-0.245
1073.556	1115.330	0.440	0.463	0.122	0.306	-0.023	-0.184
1073.704	1098.533	0.590	0.525	0.122	0.261	0.065	-0.139
1074.036	1104.733	0.450	0.496	0.159	0.289	-0.046	-0.130
1074.049	1129.881	0.640	0.693	0.170	0.280	-0.053	-0.110
1074.114	1086.708	0.630	0.707	0.224	0.271	-0.077	-0.047
1074.584	1092.855	0.580	0.652	0.201	0.261	-0.072	-0.060
1074.808	1146.678	1.070	0.976	0.388	0.278	0.094	0.111
1074.830	1068.425	0.790	0.763	0.366	0.230	0.027	0.136
1075.283	1118.227	0.600	0.624	0.173	0.285	-0.024	-0.112
1075.545	1111.396	0.640	0.620	0.135	0.298	0.020	-0.163
1075.593	1148.729	0.990	0.946	0.335	0.275	0.044	0.060
1075.625	1114.057	0.620	0.629	0.179	0.290	-0.009	-0.112
1075.739	1099.761	0.680	0.713	0.196	0.259	-0.033	-0.064
1076.480	1105.207	0.710	0.741	0.171	0.277	-0.031	-0.106
1076.711	1096.664	0.740	0.812	0.207	0.255	-0.072	-0.048
1076.794	1092.196	0.680	0.822	0.252	0.257	-0.142	-0.004
1076.868	1085.971	0.800	0.888	0.315	0.260	-0.088	0.055
1076.886	1112.962	0.700	0.732	0.235	0.279	-0.032	-0.044
1077.107	1076.096	0.920	0.910	0.366	0.239	0.010	0.127
1077.253	1138.701	1.230	1.041	0.337	0.266	0.189	0.071
1077.403	1075.386	0.920	0.804	0.360	0.233	0.116	0.127
1077.591	1101.644	0.820	0.889	0.196	0.257	-0.069	-0.061
1078.013	1097.285	0.860	0.915	0.224	0.250	-0.055	-0.026
1078.019	1141.417	1.020	0.950	0.368	0.262	0.070	0.106

Coordonnées		Profondeurs		Vitesse		Écarts	
Nord	Est	Mesurées	Simulées	Mesurées	Simulées	Profondeur	Vitesses
		(m)	(m)	(m/s)	(m/s)	(m)	(m/s)
1078.079	1068.297	0.420	0.494	0.218	0.145	-0.074	0.073
1078.225	1099.641	0.880	0.936	0.235	0.251	-0.056	-0.016
1078.887	1072.466	0.650	0.624	0.315	0.178	0.026	0.137
1079.036	1112.637	0.850	0.940	0.264	0.251	-0.090	0.012
1079.093	1137.646	1.100	0.924	0.411	0.253	0.176	0.159
1079.975	1124.532	1.100	1.135	0.285	0.226	-0.035	0.059
1080.205	1137.312	1.000	0.854	0.394	0.241	0.146	0.153
1080.232	1141.384	0.580	0.698	0.258	0.241	-0.118	0.017
1080.632	1141.684	0.580	0.593	0.258	0.233	-0.013	0.025
1080.700	1133.902	1.160	0.925	0.383	0.228	0.235	0.154
1080.923	1094.852	1.160	1.134	0.315	0.242	0.026	0.073
1081.152	1090.657	1.100	1.161	0.388	0.245	-0.061	0.144
1081.191	1096.243	1.140	1.153	0.315	0.239	-0.013	0.075
1081.673	1143.303	0.280	0.226	0.132	0.186	0.054	-0.053
1081.835	1140.522	0.360	0.371	0.285	0.204	-0.011	0.081
1082.212	1119.054	1.220	1.126	0.268	0.192	0.094	0.077
1082.747	1109.013	1.140	1.105	0.329	0.209	0.035	0.121
1083.241	1135.322	0.620	0.398	0.224	0.169	0.222	0.055
1083.532	1116.035	1.110	1.001	0.411	0.170	0.109	0.241
1083.993	1107.202	1.000	0.898	0.404	0.192	0.102	0.213
1084.040	1121.284	1.010	0.908	0.329	0.149	0.102	0.181
1084.154	1123.473	1.000	0.901	0.377	0.148	0.099	0.229
1084.329	1099.752	0.690	0.675	0.286	0.202	0.015	0.085
1084.436	1100.337	0.640	0.660	0.320	0.198	-0.020	0.122
1084.486	1110.190	0.980	0.840	0.377	0.170	0.140	0.207
1085.292	1128.934	0.430	0.375	0.204	0.098	0.055	0.106
1085.765	1123.407	0.700	0.523	0.160	0.086	0.177	0.074
1086.647	1121.053	0.390	-0.063	0.153	0.055	0.453	0.098

**Tableau 5 : Comparaison des données mesurées sur le terrain et simulées par
HYDROSIM pour un débit de 3,3 m³/s**

Coordonnées		Profondeurs		Vitesse		Écarts	
Nord	Est	Mesurées	Simulées	Mesurées	Simulées	Profondeur	Vitesses
		(m)	(m)	(m/s)	(m/s)	(m)	(m/s)
958.293	1216.145	0.530	-0.154	0.196	0.121	0.684	0.075
961.810	1201.419	0.220	0.114	0.377	0.959	0.106	-0.582
962.390	1199.654	0.360	0.215	0.488	0.978	0.145	-0.490
963.106	1194.356	0.180	0.194	0.525	0.831	-0.014	-0.306
963.413	1197.109	0.420	0.264	0.627	0.976	0.156	-0.350
967.074	1217.286	0.510	0.157	0.834	0.293	0.353	0.541
967.539	1200.473	0.220	0.274	0.544	1.031	-0.054	-0.487
969.264	1200.161	0.210	0.261	0.473	1.024	-0.051	-0.550
970.893	1199.173	0.290	0.183	0.570	0.937	0.107	-0.367
978.148	1215.310	0.260	0.363	0.885	0.499	-0.103	0.385
982.335	1203.602	0.220	0.251	0.624	0.884	-0.031	-0.260
983.195	1207.928	0.240	0.252	0.564	0.860	-0.012	-0.296
986.149	1213.154	0.300	0.290	0.418	0.640	0.010	-0.222
987.195	1204.614	0.000	0.259	-	0.845	-0.259	-0.845
987.226	1211.238	0.290	0.261	0.541	0.732	0.029	-0.191
987.562	1203.310	0.170	0.225	0.518	0.804	-0.055	-0.286
990.014	1205.698	0.250	0.263	0.723	0.834	-0.013	-0.111
990.414	1204.461	0.200	0.249	0.593	0.811	-0.049	-0.219
991.092	1204.978	0.180	0.257	0.621	0.817	-0.077	-0.196
991.844	1217.266	0.550	0.376	0.404	0.455	0.174	-0.050
992.040	1212.504	0.280	0.286	0.363	0.689	-0.006	-0.326
992.496	1215.319	0.320	0.354	0.596	0.566	-0.034	0.030
992.698	1219.459	0.380	0.373	0.752	0.299	0.007	0.453
994.864	1213.691	0.300	0.313	0.549	0.648	-0.013	-0.099
997.565	1205.406	0.260	0.245	0.610	0.788	0.015	-0.178
998.841	1221.741	0.130	-0.069	0.235	0.107	0.199	0.128
1000.953	1202.426	0.280	0.196	0.156	0.727	0.084	-0.571
1002.763	1207.278	0.280	0.265	0.680	0.744	0.015	-0.064
1002.894	1206.564	0.280	0.261	0.445	0.752	0.019	-0.307
1003.039	1216.138	0.430	0.409	0.443	0.497	0.021	-0.054
1003.399	1211.811	0.240	0.325	0.421	0.653	-0.085	-0.231
1005.680	1205.936	0.270	0.257	0.431	0.732	0.013	-0.301
1007.449	1207.062	0.260	0.282	0.576	0.705	-0.022	-0.129

Coordonnées		Profondeurs		Vitesse		Écarts	
Nord	Est	Mesurées	Simulées	Mesurées	Simulées	Profondeur	Vitesses
		(m)	(m)	(m/s)	(m/s)	(m)	(m/s)
1009.381	1203.788	0.200	0.246	0.162	0.707	-0.046	-0.546
1012.384	1214.008	0.440	0.462	0.678	0.480	-0.022	0.198
1012.716	1204.701	0.200	0.269	0.405	0.675	-0.069	-0.270
1013.028	1213.792	0.440	0.463	0.678	0.479	-0.023	0.198
1015.050	1207.057	0.230	0.310	0.383	0.624	-0.080	-0.242
1016.658	1215.692	0.480	0.401	0.717	0.302	0.079	0.416
1017.507	1211.612	0.550	0.471	0.564	0.491	0.079	0.073
1017.985	1215.883	0.450	0.346	0.536	0.228	0.104	0.308
1018.080	1207.785	0.290	0.351	0.553	0.584	-0.061	-0.031
1020.771	1212.593	0.600	0.503	0.666	0.388	0.097	0.278
1026.268	1211.193	0.580	0.530	0.536	0.325	0.050	0.211
1029.907	1210.327	0.500	0.490	0.627	0.270	0.010	0.356
1031.105	1199.234	0.340	0.455	0.451	0.513	-0.115	-0.063
1032.231	1208.960	0.580	0.554	0.533	0.289	0.026	0.244
1033.419	1209.914	0.030	0.263	0.627	0.170	-0.233	0.456
1034.752	1189.608	0.200	0.173	0.113	0.409	0.027	-0.296
1040.405	1196.157	0.630	0.639	0.341	0.424	-0.009	-0.083
1041.283	1200.527	0.800	0.845	0.428	0.390	-0.045	0.038
1042.313	1200.806	0.850	0.811	0.479	0.373	0.039	0.107
1042.931	1196.101	0.750	0.772	0.363	0.398	-0.022	-0.036
1044.126	1198.128	1.000	0.930	0.413	0.377	0.070	0.036
1044.972	1185.330	0.260	0.218	0.079	0.392	0.042	-0.313
1045.196	1197.901	1.050	0.954	0.427	0.366	0.096	0.060
1045.630	1187.498	0.300	0.317	0.165	0.391	-0.017	-0.225
1047.417	1201.813	0.410	0.462	0.402	0.250	-0.052	0.152
1047.840	1198.405	0.960	0.827	0.427	0.325	0.133	0.102
1047.910	1200.644	0.580	0.592	0.427	0.276	-0.012	0.150
1049.902	1188.103	0.540	0.587	0.266	0.384	-0.047	-0.118
1050.300	1189.577	0.690	0.708	0.285	0.377	-0.018	-0.092
1050.347	1183.117	0.360	0.370	0.160	0.397	-0.010	-0.237
1051.028	1190.123	0.760	0.781	0.302	0.372	-0.021	-0.070
1051.917	1185.178	0.500	0.560	0.282	0.388	-0.060	-0.106
1053.216	1185.757	0.620	0.665	0.327	0.382	-0.045	-0.056
1055.362	1187.375	0.930	0.862	0.329	0.363	0.068	-0.033
1056.674	1192.677	0.920	0.874	0.374	0.269	0.046	0.105
1057.829	1188.870	1.100	0.924	0.429	0.318	0.176	0.111
1411.570	1425.527	0.760	0.874	0.369	0.283	-0.114	0.086

Coordonnées		Profondeurs		Vitesse		Écart	
Nord	Est	Mesurées	Simulées	Mesurées	Simulées	Profondeur	Vitesses
		(m)	(m)	(m/s)	(m/s)	(m)	(m/s)
1411.807	1437.693	0.290	0.351	0.156	0.252	-0.061	-0.096
1411.996	1419.169	0.310	0.360	0.249	0.192	-0.050	0.058
1414.688	1436.489	0.320	0.412	0.145	0.273	-0.092	-0.128
1417.111	1425.710	0.180	0.885	0.422	0.282	-0.705	0.141
1421.516	1420.709	0.550	0.635	0.366	0.230	-0.085	0.135
1424.397	1434.215	0.380	0.562	0.164	0.303	-0.182	-0.139
1424.559	1435.765	0.240	0.442	0.170	0.294	-0.202	-0.124
1428.191	1430.413	0.580	0.714	0.380	0.308	-0.134	0.072
1428.696	1433.320	0.500	0.585	0.275	0.313	-0.085	-0.038
1430.255	1421.754	0.680	0.772	0.343	0.234	-0.092	0.109
1430.893	1430.152	0.600	0.750	0.326	0.311	-0.150	0.015
1431.252	1436.365	0.270	0.406	0.045	0.307	-0.136	-0.262
1431.771	1420.997	0.500	0.593	0.244	0.212	-0.093	0.032
1432.966	1432.008	0.580	0.646	0.264	0.320	-0.066	-0.056
1434.104	1435.235	0.410	0.509	0.241	0.321	-0.099	-0.080
1438.752	1423.397	0.790	0.800	0.360	0.254	-0.010	0.106
1439.164	1424.674	0.760	0.873	0.417	0.274	-0.113	0.143
1458.075	1441.237	0.120	0.146	0.020	0.313	-0.026	-0.293
1460.531	1441.825	0.120	0.120	0.042	0.308	0.000	-0.265
1460.678	1426.990	0.820	0.973	0.479	0.280	-0.153	0.199
1462.138	1424.033	0.320	0.369	0.258	0.176	-0.049	0.081
1464.892	1432.594	0.750	0.772	0.337	0.336	-0.022	0.002
1465.141	1442.236	0.100	0.137	0.006	0.323	-0.037	-0.317
1465.815	1438.384	0.370	0.398	0.176	0.364	-0.028	-0.189
1467.259	1442.841	0.120	0.135	0.006	0.326	-0.015	-0.321
1469.383	1442.998	0.170	0.167	0.017	0.338	0.003	-0.321
1470.739	1433.953	1.350	0.812	0.405	0.336	0.538	0.069
1471.570	1429.094	1.040	1.052	0.496	0.267	-0.012	0.229
1473.288	1444.645	0.130	0.126	0.051	0.335	0.004	-0.284
1475.094	1437.943	0.550	0.621	0.264	0.359	-0.071	-0.095
1476.211	1429.805	0.960	1.006	0.235	0.253	-0.046	-0.017
1476.436	1435.938	0.840	0.806	0.360	0.342	0.034	0.018
1476.902	1447.369	0.180	0.079	0.006	0.294	0.101	-0.289
1477.193	1432.535	1.150	1.046	0.473	0.302	0.104	0.172
1477.719	1430.493	1.040	1.005	0.445	0.259	0.035	0.186
1479.229	1430.925	1.000	0.989	0.383	0.258	0.011	0.124

**Tableau 6 : Comparaison des données mesurées sur le terrain et simulées par
HYDROSIM pour un débit de 5,6 m³/s**

Coordonnées		Profondeurs		Vitesse		Écarts	
Nord	Est	Mesurées	Simulées	Mesurées	Simulées	Profondeur	Vitesses
		(m)	(m)	(m/s)	(m/s)	(m)	(m/s)
1538.173	1481.335	0.180	0.114	0.184	0.259	0.066	-0.074
1538.168	1479.669	0.200	0.235	0.485	0.376	-0.035	0.109
1537.994	1476.611	0.240	0.257	0.482	0.509	-0.017	-0.027
1550.088	1461.775	0.310	0.493	0.785	0.421	-0.183	0.364
1550.626	1459.169	0.420	0.551	0.865	0.270	-0.131	0.595
1538.696	1466.396	0.500	0.383	0.525	0.633	0.117	-0.109
1546.580	1484.840	0.260	0.251	0.598	0.410	0.009	0.188
1542.231	1458.551	0.490	0.530	0.746	0.429	-0.040	0.317
1541.543	1458.419	0.500	0.534	0.672	0.435	-0.034	0.237
1541.725	1454.821	0.600	0.512	0.598	0.247	0.088	0.351
1539.218	1457.931	0.600	0.545	0.627	0.452	0.055	0.175
1533.014	1462.932	0.520	0.438	0.468	0.595	0.082	-0.127
1533.545	1462.925	0.520	0.444	0.468	0.594	0.076	-0.126
1531.783	1464.735	0.410	0.379	0.502	0.611	0.031	-0.109
1529.574	1467.954	0.300	0.300	0.434	0.579	0.000	-0.145
1528.037	1468.592	0.310	0.276	0.332	0.549	0.034	-0.217
1525.113	1470.439	0.260	0.207	0.388	0.433	0.053	-0.045
1529.860	1451.724	0.680	0.634	0.695	0.370	0.046	0.325
1530.081	1448.870	0.500	0.394	0.312	0.204	0.106	0.107
1527.411	1449.498	0.690	0.606	0.496	0.323	0.084	0.173
1522.018	1456.722	0.560	0.559	0.332	0.528	0.001	-0.196
1515.246	1454.532	0.480	0.551	0.388	0.501	-0.071	-0.113
1514.962	1452.101	0.620	0.659	0.513	0.474	-0.039	0.039
1514.481	1449.166	0.630	0.771	0.493	0.431	-0.141	0.062
1508.321	1448.848	0.720	0.730	0.485	0.440	-0.010	0.044
1505.727	1452.446	0.460	0.465	0.286	0.466	-0.005	-0.180
1504.536	1455.382	0.260	0.372	0.269	0.445	-0.112	-0.176
1509.084	1462.759	0.220	0.196	0.264	0.331	0.024	-0.067
1508.861	1461.179	0.220	0.254	0.232	0.389	-0.034	-0.156
1505.887	1459.630	0.220	0.270	0.173	0.378	-0.050	-0.206
1503.313	1457.811	0.290	0.294	0.150	0.385	-0.004	-0.234
1502.260	1458.215	0.230	0.274	0.215	0.356	-0.044	-0.140
1501.158	1455.303	0.320	0.335	0.170	0.409	-0.015	-0.239

Coordonnées		Profondeurs		Vitesse		Écart	
Nord	Est	Mesurées	Simulées	Mesurées	Simulées	Profondeur	Vitesses
		(m)	(m)	(m/s)	(m/s)	(m)	(m/s)
1500.662	1451.036	0.410	0.438	0.198	0.444	-0.028	-0.246
1499.671	1451.263	0.420	0.427	0.284	0.440	-0.007	-0.157
1500.553	1448.243	0.600	0.591	0.320	0.436	0.009	-0.115
1499.859	1445.506	0.750	0.783	0.380	0.414	-0.033	-0.035
1494.926	1445.088	0.630	0.676	0.320	0.416	-0.046	-0.095
1491.881	1451.475	0.250	0.297	0.125	0.386	-0.047	-0.262