

2m11.2792.1

Université de Montréal

nrb : 11 330 555
V.007

Suivi à long terme des effets de structures améliorant l'habitat du poisson: Le cas de Lawrence Creek, Wisconsin, USA.

par

**Olivier Champoux
Département de Géographie
Faculté des arts et des sciences**

**Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de
Maître ès Sciences (M.Sc.)
en géographie**

Juin 2000

© Olivier Champoux, 2000



Page d'identification du jury

**Université de Montréal
Faculté des études supérieures**

Ce mémoire intitulé

**Suivi à long terme des effets de structures améliorant l'habitat du poisson: Le
cas de Lawrence Creek, Wisconsin, USA.**

présenté par

Olivier Champoux

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes:

François Courchesne

Normand Bergeron

Pascale M. Biron

André G. Roy

Mémoire accepté le: 23 août 2000

À la mémoire de Colette,

The sand of times were eroded by

The river of constant change.

Genesis, 1973

SOMMAIRE

Depuis plusieurs décennies, la dégradation de la qualité de l'habitat des salmonidés en rivières inquiète les gestionnaires, les pêcheurs sportifs et les scientifiques. Aux États-Unis et au Canada, des travaux visant à améliorer les habitats fluviaux ont souvent donné de bons résultats à court terme. Par ailleurs, peu d'études ont porté sur l'impact à long terme des aménagements sur l'habitat des salmonidés et sur la dynamique des rivières. Le but de notre étude est de documenter l'effet de structures aménagées dans une petite rivière du Wisconsin. La Lawrence Creek a été aménagée en 1966 en raison de la diminution importante des superficies de l'habitat physique propice à la truite. Suite aux travaux d'aménagement, Hunt (1969, 1971, 1976) a montré que l'amélioration de l'habitat physique dans la rivière a contribué à l'augmentation des populations de truites. Nous avons comparé les cartes d'habitats produites en 1963 et en 1966 à une nouvelle carte que nous avons réalisée en avril 1999 sur une distance de 600 m. Cette carte couvrait deux sections géomorphologiques distinctes, soit une section coulant sur des dépôts morainiques et une autre, en aval, sur des dépôts d'épandage glaciaire. Nos résultats indiquent que l'habitat dans la Lawrence Creek est meilleur qu'en 1963, mais régresse par rapport à l'état de 1966. La superficie des fosses a augmenté de 134% de 1963 à 1966 pour ensuite diminuer de 22 % entre 1966 et 1999. La longueur du couvert offert par les structures encore en bon état a aussi fortement diminué, passant de 420m en 1966 à 228 m en 1999 soit une diminution de 46%. Il semble en effet que les processus d'ajustement soient actifs malgré l'apparente stabilité apportée par les structures aménagées en 1966. Une carte des forces tractrices près du lit montre que la section morainique est propice à l'instabilité. Les sédiments de cette section sont transportés vers la section aval, changeant le bilan sédimentaire et par conséquent les processus d'ajustement. Cette instabilité semble être la cause de la dégradation des structures observée sur le terrain. Même si l'on constate que les habitats pour la truite demeurent bons en 1999, les processus d'ajustement entraînent une dégradation lente des habitats. Tout porte à croire que le manque d'entretien et l'emplacement initial des structures est responsable d'un retour vers un état moins stable qu'en 1966.

La dynamique de l'écoulement près des structures ressemble aux observations faites sur les méandres en milieu naturel. De plus, les structures installées sur la Lawrence Creek

permettent la création d'une dynamique de l'écoulement particulière. Il existe une zone tampon entre l'écoulement près des structures et celui plus éloigné. Cette différence entraîne une augmentation de l'intensité turbulente près du lit et de la structure. Ceci serait un des facteurs contribuant au développement et au maintien des mouilles.

Mots-clés : Habitats physiques, aménagements, morphologie, dynamique fluviale, hydraulique

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE.....	iii
TABLES DES MATIÈRES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES.....	viii
REMERCIEMENTS.....	xii
INTRODUCTION	1
Chapitre 1 CONTEXTE DE LA RECHERCHE.....	4
1.1) Définitions et notions de bases	4
1.2) Les débuts des aménagements pour l'amélioration de l'habitat des salmonidés.....	5
1.3) Éclosion du mouvement de restauration des rivières.....	8
1.4) Les états du Mid-Ouest américain: le cas du Wisconsin.....	11
1.5) Connaissances et adaptation des techniques.....	18
1.6) Importance des gros débris organiques dans les projets d'aménagement	19
1.7) Le lien entre l'hydraulique et les aménagements.....	20
1.8) Réalisme des résultats obtenus avec des aménagements	25
Chapitre 2 PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODOLOGIE.....	27
2.1) Problématique et objectifs.....	27
2.2) Description de la rivière à l'étude	28
2.2.1) Choix et historique du site.....	32
2.3) Méthode.....	34
2.3.1) Collecte des données de terrain (données topographiques et qualitatives).....	34
2.3.2) Collecte des données de terrain (données hydrauliques).....	37
2.3.3) Techniques d'analyse	45
2.3.3.1) Analyse des documents historiques	45
2.3.3.2) Analyse des données topographiques.....	49
2.3.3.3) Analyse des données hydrauliques.....	54
Chapitre 3 RÉSULTATS.....	57
3.1 Approche.....	57
3.2 Examen visuel des cartes d'habitat.....	58
3.2.1 Section 56-50.....	58
3.2.2 Section 50-47.....	60
3.2.3 Section 47-44.....	62
3.2.4 Section 44-41.....	64
3.2.5 Section 41-39.....	66
3.2.6 Section 39-37.....	68
3.3 Valeurs des différentes composantes de l'habitat physique	70

3.3.1 Effets du Contexte géomorphologique sur les changements dans l'habitat	74
3.3.2 Synthèse des résultats.....	77
3.4 Morphologie et topographie.....	79
3.5 Indicateurs hydrauliques	87
3.6 Carte des préférences et estimations des populations de poissons en 1999	94
3.7 Étude détaillée de l'hydraulique et de la turbulence dans une section.....	99
Chapitre 4 DISCUSSION.....	112
4.1 Synthèse des observations	113
4.2 Habitat et dynamique d'ajustement.....	114
4.2 Hydraulique près des structures.....	122
4.3 Généralisation de l'étude.....	124
Chapitre 5 CONCLUSION	126
RÉFÉRENCES.....	128
ANNEXES.....	135

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Changements morphologiques et sédimentologiques de la rivière Lawrence Creek avant et après les travaux d'aménagement (Hunt, 1969).....	12
Tableau 2.1	Comparaison statistique des techniques de mesures.....	47
Tableau 2.1	Variables utilisées pour la comparaison des cartes et méthodes de calcul utilisées.....	47
Tableau 3.1	Composantes de l'habitat physique selon les trois années de cartographie.....	70
Tableau 3.2	Analyse qualitative de l'habitat physique selon trois composantes.....	78
Tableau 3.3	Analyse statistique des deux méthodes de prises de vitesse (terrain et manning).....	89
Tableau 3.4	Estimations des populations de poissons par un modèle mathématique et tests statistiques sur les différences.....	98
Tableau 3.5	Caractéristiques des coupes transversale.....	100
Tableau 3.6	Valeur des test-t pour les valeurs moyennes d'intensité turbulente....	110

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Exemples de structures utilisées dans la restauration de l'habitat physique du poisson. a) Déflecteur simple en bois, b) Déflecteur en travers sur le lit (cross-channel log) c) Barrage en V (Wedge dam) d) Gros blocs	6
Figure 1.2	Évolution du nombre de publications depuis 1930. CCC= <i>Civilian Conservation Corps</i> , WPA= <i>Works Progress Administration</i> , DJ= <i>Dingle-Johnson act</i> de 1950, NEPA= <i>U.S. National Environmental Protection Act</i> . (WHITE, 1996)	9
Figure 1.3	Déflecteur et couvert (deflector bank cover) installés sur la rivière Lawrence Creek au Wisconsin. (tiré de Hunt, 1993)	13
Figure 1.4	Corrélation entre l'aire des fosses par station et la moyenne de nombre de truite A. Pour avril 1961-1963 (avant travaux) B. Pour avril 1965- 1967 (après travaux) (Hunt, 1971).....	15
Figure 1.5	A. Structure des années 30 utilisée par les castors sur la rivière Big-Roche-a-cri Creek au Wisconsin. B. Déflecteur de courant des années 30 détruit sur la rivière Big-Roche-a-cri Creek au Wisconsin. (White, 1972)	16
Figure 1.6	Changements morphologiques selon l'orientation des gros débris organiques (Hildebrand <i>et al.</i> , 1998)	21
Figure 1.7	Forme de différentes structures, lignes d'écoulement à différents niveaux d'eau et effets sur la morphologie du lit de la rivière (Hey 1996).....	23
Figure 1.8	Intensité turbulente moyenne a) longitudinale b) latérale et c) verticale à trois hauteur au-dessus du lit. Les barres pleines = en aval de l'obstacle et barre pointillées = en amont de l'obstacle (selon Bouckaert et Davis, 1998)	24
Figure 1.9	Topographie d'un méandre après l'installation de structures (Paice et Hey, 1992)	26
Figure 2.1	A. Lawrence Creek B. État du Wisconsin	29
Figure 2.2	Contexte géomorphologique.....	30
Figure 2.3	Débit journalier de la Lawrence Creek entre 1967 et 1973 (USGS, station n ^o 04072750)) Débit lors de la prise de données	31

Figure 2.4	A. Carte d'habitat de 1963 B. Carte d'habitat de 1966.....	35
Figure 2.5	Station totale LEICA 805TL.....	36
Figure 2.6	Condition physiques des structures A. « échec » B. « succès » C. « moyenne »	38
Figure 2.7	Vélocimètres électromagnétiques Marsh-McBirney (ECM)	39
Figure 2.8	A. Tige pliée en forme de U et deux ECMS B. Acquisition des données hydrauliques avec la tige géoréférencée et C. Stockage des données dans l'accumulateur et transfert vers l'ordinateur portatif.....	41
Figure 2.9	Principe de géoréférence des mesures de vitesses (tiré de Lane <i>et al.</i> 1998)	42
Figure 2.10	Localisation des coupes transversales.....	44
Figure 2.11	Localisation des composantes mesurées le long de la coupe transversale # 1.....	46
Figure 2.12	Comparaison des superficies de mouilles selon les deux techniques de calcul :  Hunt, Champoux 	48
Figure 2.13	A. Courbe de préférence de la truite mouchetée (<i>Salvelinus fontinalis</i>) pour la vitesse de l'écoulement B. Courbe de préférence de la truite mouchetée (<i>Salvelinus fontinalis</i>) pour la profondeur (tirées et adaptées de Raleigh,1982).....	53
Figure 3.1	Cartes d'habitat section 56-50.....	59
Figure 3.2	Cartes d'habitat section 50-47.....	61
Figure 3.3	Cartes d'habitat section 47-44.....	63
Figure 3.4	Cartes d'habitat section 44-41.....	65
Figure 3.5	Cartes d'habitat section 41-39.....	67
Figure 3.6	Cartes d'habitat section 39-37.....	69
Figure 3.7	Pourcentage de changement pour la section de 600m.....	73
Figure 3.8	Pourcentage de changement pour la section morainique.....	75
Figure 3.9	Pourcentage de changement pour la section d'épandage.....	76

Figure 3.10	Topographie du lit de la section de 600 m.....	80
Figure 3.11	Profils longitudinaux de 1966 et 1999.....	81
Figure 3.12	Courbes des différences et des différences cumulées des élévations	83
Figure 3.13	Distribution spatiale des mouilles dans une section A. en 1963 B. en 1966 C. en 1999.....	86
Figure 3.14	Comparaison des vitesses moyennes mesurées sur le terrain et des vitesses estimées par l'équation de Manning (en cm/s).....	88
Figure 3.15	A. Vitesse moyenne estimée (m/s) B. Contrainte de cisaillement (N/m ²) Profondeur (m) le long du talweg en 1999	90
Figure 3.16	Vitesses estimées pour la section de 600 m.....	92
Figure 3.17	Contraintes tractrices estimées	93
Figure 3.18	Indice de qualité de l'habitat en 1999	95
Figure 3.19	A. Relation entre l'aire des mouilles et le nombre de truite de 15 cm et plus (Hunt, 1971) B. Modèle Mathématique pour la prédiction du nombre de truite de 15 cm et plus pour les six stations de l'étude.....	97
Figure 3.20	Localisation des coupes transversales.....	101
Figure 3.21	A. Vitesse longitudinale moyenne (cm/s) B. Intensité turbulente	102
Figure 3.22	A. Vitesse longitudinale moyenne (cm/s) B. Intensité turbulente	103
Figure 3.23	A. Vitesse longitudinale moyenne (cm/s) B. Intensité turbulente	105
Figure 3.24	A. Vitesse longitudinale moyenne (cm/s) B. Intensité turbulente	106
Figure 3.25	A. Vitesse longitudinale moyenne (cm/s) B. Intensité turbulente	108
Figure 3.26	Moyenne de l'intensité turbulente selon la distance de la structure et de la position dans la tranche d'eau	109

Figure 4.1	Zones de transport et de non-transport des sédiments en fonction des contraintes de cisaillement critique.....	117
Figure 4.2	Schématisation du déplacement des mouilles vers l'amont.....	119

REMERCIEMENTS

Cette recherche n'aurait jamais pu être réalisée sans le soutien financier du FCAR, merci. De nombreuses personnes ont participé, sans vraiment le réaliser, à l'accomplissement de ce travail de longue haleine. À tous ceux et celles que j'ai côtoyés au département ou à l'extérieur, je vous dis aussi merci.

Ce travail a été rendu possible en grande partie grâce à des gens qui ont cru au projet et dans lequel ils se sont engagés. Je tiens à remercier le Département des ressources naturelles du Wisconsin d'avoir eu cet enthousiasme pour ce projet. Je désire aussi les remercier pour nous avoir si gentiment prêté les cartes d'habitat de Lawrence Creek. Je tiens aussi à remercier Monsieur Elward Engle qui les a dessinées en 1963 et 1966. Je remercie aussi Monsieur Robert L. Hunt pour m'avoir prêté sa collection de photographies et donné quelques conseils sur le terrain. Je tiens à remercier tout spécialement Ed Avery pour sa gentillesse, sa disponibilité ainsi que de nous avoir facilité le lien avec le WDNR. Enfin, je tiens à remercier tout spécialement mes deux coéquipiers de terrain qui ont bravement subi sans rien dire les marécages tout autour de la rivière, les mouches noires des derniers jours et la célèbre bouffe américaine : Andrea Bell et Gino Beauchamp, qu'aurais-je fait sans vous?

De plus, mes remerciements vont à tous les membres du groupe de recherche qui contribuent à un environnement stimulant où la recherche devient une partie de plaisir : Tom, Nadine, Nathalie, Hélène, Mélissa, Gino, Mylène, Daniel, Alistair, Anne et Antoine. Comment oublier une amitié comme celle-là?

Je tiens aussi à remercier mes parents et mon frère qui ont toujours été fiers de ce que je faisais et qui ont contribué à développer ma curiosité face au monde. Merci aussi à Valérie d'être là et de croire en moi.

Enfin, je tiens à remercier tout spécialement André Roy et Pascale Biron, deux chercheurs exceptionnels et rigoureux, mais avant tout humains et amis. Merci de m'avoir fait confiance et de m'avoir permis de travailler dans un environnement des plus stimulants.

INTRODUCTION

Depuis le début de l'ère industrielle, les rivières ont subi plusieurs bouleversements d'origine anthropique (Hunter, 1996). Récemment, les liens entre les modifications des cours d'eau et la diversité des habitats physiques du poisson ont été étudiés par plusieurs chercheurs (House et Boehene, 1985, 1986 ; Glover, 1986 Andrus *et al.* 1988 ; Brooke, 1990, 1995 ; Montgomery *et al.* 1995 ; Rabeni et Jacobson 1993 ; White, 1996). Le déboisement associé à l'industrie forestière a contribué à la diminution du couvert, de l'abri dans les rivières ainsi qu'à l'augmentation du ruissellement amenant une quantité importante de sédiments fins dans les zones de reproduction et de production de nourriture pour les salmonidés (Tarzwell, 1931 ; Hunt, 1993 ; Hunter, 1996). Les activités anthropiques (agriculture, foresterie, industrie minière, élevage de bovin) pratiquées depuis 1850 ont aussi contribué à la dégradation de la séquence seuil-mouille des rivières. Cette séquence est essentielle à la survie des salmonidés puisqu'elle est à la base de la formation de leur habitat (Bisson *et al.*, 1982). Les mouilles sont les zones plus profondes de la rivière où les vitesses de l'écoulement sont plus faibles en période d'étiage. Les seuils correspondent aux zones moins profondes des rivières où la vitesse de l'écoulement est plus rapide. Les seuils permettent une ré-oxygénation de l'eau et servent à la fraie des salmonidés.

En 1909, Théodore Roosevelt, alors président des États-Unis, prône l'idée de l'utilisation de la science dans la conservation de l'environnement. Finalement, c'est vers 1925 que le gouvernement américain entreprit le contrôle et la protection de la faune. Quelques années plus tard les premiers travaux visant l'amélioration de l'habitat du poisson en rivière ont débuté. L'amélioration de la qualité de l'habitat physique du poisson en rivière passe par l'installation de structures faites de divers matériaux (troncs d'arbres, blocs,...) afin de recréer les conditions favorables à la survie et au développement des espèces de poisson visées par les travaux, généralement les salmonidés (Hunt, 1993; Hunter, 1996)

Les premières études scientifiques sur l'aménagement des rivières ont montré que les structures installées amélioreraient la qualité de l'habitat physique du poisson (Tarzwell, 1937; Shetter *et al.*, 1949). Par contre, ces études n'ont démontré l'effet des

structures que sur une courte période. Les travaux d'aménagement de rivières sont onéreux et, par conséquent, les gouvernements qui investissent dans les travaux veulent que ceux-ci durent le plus longtemps possible. Frissell et Nawa (1992) ont montré que peu de structures peuvent résister plus de 20 ans dans les rivières de l'Ouest américain. Il devient alors primordial de connaître les effets morphologiques et sédimentologiques à long terme des structures afin de mieux concevoir les aménagements, d'augmenter la longévité des structures et d'ainsi améliorer l'habitat des salmonidés. À ce propos, Hunt se demandait en 1971 si une période de 20 à 25 ans était réaliste pour la survie d'une structure. Il mentionnait qu'il était, à ce moment-là, impossible de le savoir à cause du manque d'étude et de données. Il est surprenant de constater que ce problème persiste toujours.

Une des conditions primordiales au succès d'un programme de restauration est la connaissance du comportement hydraulique des rivières, de leur morphologie et de leur sédimentologie (Hunt, 1993; Hey, 1996). Depuis 1930, la connaissance et le rôle de l'hydraulique dans les programmes d'aménagement sont peu présents. White (1996) a montré que seulement 2,7 % des articles publiés depuis 1930 sur les travaux visant l'amélioration de l'habitat du poisson intégraient les aspects hydrauliques. Dans la majorité des études, le comportement hydraulique des rivières se limite généralement à l'énumération de quelques données de base comme la vitesse moyenne de l'écoulement et le débit sans les mettre en relation avec les structures. L'accent est mis sur les effets sur les populations de poisson et sur la morphologie de la rivière. Il devient donc important de connaître la relation entre les aménagements et l'hydraulique particulière générée par ceux-ci.

Aussi, l'hydraulique est à la base des processus d'ajustement des cours d'eau. Un cours d'eau qui subit un changement d'origine anthropique (e.g. coupure de méandres, réalignement...) utilisera les processus d'ajustement afin de rétablir l'équilibre dans ses pentes ainsi que dans son bilan sédimentaire. Par conséquent, certaines sections du cours d'eau seront soumises à une dynamique de dégradation ou d'aggradation. À la lumière de ces faits, il devient important de documenter la dynamique d'ajustement des cours d'eau suite à l'implantation d'aménagements qui pourraient introduire une certaine instabilité dans le système. De plus, l'on constate

que dans les études de l'habitat physique du poisson, l'hydraulique est peu utilisée pour caractériser l'habitat. C'est-à-dire que la caractérisation de la qualité et de la disponibilité des habitats se fait sans faire intervenir les composantes hydrauliques. Pourtant, Sullivan (1986) a montré l'étroite relation entre l'hydraulique de la rivière et l'habitat physique du poisson. Par conséquent, la connaissance de cette dynamique est importante lorsque l'on veut caractériser l'habitat physique du poisson surtout lorsque des structures sont installées.

La philosophie des programmes d'aménagement des rivières est très différente d'une région à l'autre. Par exemple, au Wisconsin, les aménagements sont financés par les diverses agences gouvernementales et se font dans un cadre scientifique sujet à une philosophie particulière. C'est-à-dire que les chercheurs essaient de trouver les structures qui favorisent à la fois les salmonidés, la rivière elle-même et l'homme (en essayant de camoufler d'une manière esthétique les structures). Dans d'autres états, particulièrement ceux de la région des Rocheuses, la vision est très différente. Les aménagements sont financés par des organismes tels *Trout Unlimited* et visent particulièrement l'amélioration rapide de la qualité de pêche par l'installation de structures. Il faut dire que dans la plupart des cas, il existe aussi un suivi scientifique généralement à court terme. Pour les États de la Nouvelle-Angleterre, les rivières sont aménagées par des sections locales de *Trout Unlimited* mais aussi par des organismes des différents états. Par contre, depuis quelques années, peu d'articles scientifiques proviennent des états de la Nouvelle-Angleterre où les aménagements ont connu une plus grande popularité dans les années 70 (White, 1996)

Par conséquent, d'une région à l'autre, la manière d'évaluer les aménagements va changer et le contexte régional de la rivière prend une grande importance. Les conditions hydrologiques, hydrauliques, morphologiques et sédimentaires étant toutes différentes d'un endroit à l'autre, l'analyse doit tenir compte du changement des conditions. On ne peut appliquer une méthode d'analyse pour toutes les rivières. Par contre, le noyau central de toutes les évaluations, c'est-à-dire le fondement méthodologique, reste le même et passe par l'intégration de la morphologie, de la sédimentologie et de l'hydraulique dans la caractérisation de l'habitat physique du poisson.

La revue de littérature présente les fondements de l'aménagement des rivières depuis 70 ans et va permettre de mettre en lumière les connaissances acquises de même que les lacunes. Ceci va nous permettre de situer cette recherche en d'en mieux comprendre ses objectifs.

Chapitre 1

CONTEXTE DE LA RECHERCHE

1.1) Définitions et notions de bases

White (1996) a recensé plus de 1207 articles publiés sur l'amélioration de la qualité de l'habitat du poisson en rivière depuis 1930. Étant donné la quantité considérable des écrits, la meilleure façon de faire une revue de cette littérature est de procéder dans une perspective historique. Cette perspective va permettre de faire ressortir un gradient dans l'apprentissage des méthodes d'évaluation et d'acquisition des connaissances tout en mettant en évidence les lacunes d'une discipline encore très jeune et en pleine expansion. Cette revue de la littérature sera divisée en deux grandes parties. La première traitera de l'évaluation des aménagements sur les rivières, tandis que la seconde portera sur les liens entre l'hydraulique des rivières et les aménagements.

Avant la présentation de la littérature, quelques notions de base sont présentées afin de mieux comprendre la littérature pertinente. Depuis 1930, 37% des études publiées sur l'habitat des poissons portaient sur les aménagements (White, 1996). L'objectif principal de l'aménagement des rivières est de rétablir les conditions propices à la survie et au développement des poissons. Pour leur survie, les salmonidés ont besoin de couvert pour les protéger, d'ombre, d'une température d'eau d'environ 10°C, de mouilles et de seuils. Les conditions hydrauliques sont très importantes pour les salmonidés. Ils ont besoin de zones où les vitesses sont modérées afin de pouvoir se nourrir et se protéger (mouilles). Pour leur reproduction, (ces sites se retrouvent sur les seuils) ils ont besoin de zones de vitesses plus élevées où le substrat est grossier afin que les œufs ne soient pas étouffés

La réhabilitation des conditions propices aux salmonidés passe par l'installation, dans les rivières, de structures faites de divers matériaux (Figure 1.1). Le rôle de ces structures est généralement le même, soit de contribuer à la formation de mouilles et d'éliminer les dépôts de particules fines. Le principe hydraulique permettant d'obtenir plus de mouilles et un substrat plus grossier est aussi sensiblement le même. Les structures favorisent une accélération de la vitesse de l'écoulement faisant augmenter le cisaillement au lit. L'augmentation du cisaillement entraîne l'affouillement de la rivière pour former les mouilles et permet d'évacuer les sédiments les plus fins en les mettant en transport. Par contre, les structures utilisées seront différentes si l'objectif est de créer une mouille ou un seuil. Si l'objectif est de créer une mouille une structure de type déflecteur (Figure 1.1 a et b) sera utilisée pour surcreuser le lit de la rivière. Par contre pour créer un seuil, donc une zone de vitesse plus élevée au substrat plus grossier, les structures utilisées seront de type " seuils artificiels " (Figure 1.1 c). Ceux-ci permettent une mise en transport des sédiments les plus fins et une oxygénation de l'eau. L'utilisation de gros obstacles (figure 1.1 d) permet de fournir de l'abri aux salmonidés.

1.2) Les débuts des aménagements pour l'amélioration de l'habitat des salmonidés

Dès 1930, les chercheurs se sont intéressés à la restauration des rivières. Les premières publications sur l'utilisation de structures pour améliorer la qualité de l'habitat du poisson proviennent du Michigan (Tarzwell, 1931 ; Tarzwell, 1937 ; Shetter *et al.*, 1949). Cet état est le premier à se doter d'un programme de restauration et d'évaluation des aménagements. En 1931, Tarzwell publie un article dans lequel il expose les causes de la dégradation des rivières et leurs conséquences sur l'habitat du poisson. Il mentionne que l'agriculture et l'industrie forestière sont en grande partie responsables de la dégradation de la qualité de l'habitat physique du poisson dans les rivières. Tarzwell (1931) indique dans son article les moyens utilisés depuis 1930 afin de rétablir des conditions favorables aux populations de salmonidés. Les déflecteurs de courant ont été utilisés pour créer des mouilles dans le lit de la rivière et fournir un abri

**a****b****c****d**

Figure 1.1 Exemples de structures utilisées dans la restauration de l'habitat physique du poisson. a) Déflecteur simple en bois, b) Déflecteur en travers sur le lit (cross- channel log) c) Barrage en V (Wedge dam) d) Gros blocs

et de l'ombre aux poissons. Tarzwell (1931) décrit de quelle manière les structures ont été placées et avec quels matériaux elles sont fabriquées. Par ailleurs, il ne démontre pas l'efficacité des aménagements d'une manière quantitative. Il essaie plutôt de décrire ce que les chercheurs ont fait pour ensuite pouvoir, dans le futur, le démontrer quantitativement. Les aménagements semblent cependant entraîner des résultats positifs au niveau morphologique, comme dans l'augmentation du nombre de mouilles et de leur profondeur moyenne.

Six ans plus tard, Tarzwell (1937) présente une autre étude, mais cette fois-ci, quantitative. Les données utilisées dans cet article couvrent une période de sept ans. C'est un des premiers chercheurs qui utilise ce qui deviendra une méthodologie classique, soit celle d'avoir des données morphologiques et sédimentologiques avant l'implantation des structures et quelques années après. Tarzwell (1937) observe que les aménagements ont contribué d'une manière considérable à l'augmentation du nombre de mouilles dans plusieurs rivières, à l'augmentation de leur profondeur ainsi qu'à la diminution de la superficie du lit couverte par le sable. De plus, il utilise des données enregistrées par les pêcheurs (dont le nombre s'accroît). Ces données montrent que le nombre de poissons pêchés a augmenté dans plusieurs rivières de manière significative. Il met en doute ces résultats à cause de l'augmentation de la pression de pêche sur la rivière. Enfin, Tarzwell (1937) observe que des structures ont été plus efficaces sur certaines rivières. Avec cette étude, l'importance du contexte des rivières dans l'aménagement des cours d'eau commence à ressortir.

La littérature sur les aménagements, avant 1940, est en grande partie descriptive, plus particulièrement sur les types de structures utilisés dans les rivières. Dans plusieurs publications, certaines idées avancées (types et techniques d'aménagements) se sont avérées plus tard irrecevables ou voire même dérisoires (White, 1996). Malgré tout, il y a eu un nombre important de publications dans les années 30 à 40 et plusieurs projets de restauration ont vu le jour et ont fourni du travail durant la Crise économique.

Shetter *et al.* (1949) ont produit une étude biologique de plusieurs rivières du Michigan. Leur objectif est de démontrer l'efficacité des structures sur les processus

biologiques dans la rivière. Shetter *et al.* (1949) utilisent des données sur le nombre de poissons mesurés dans la rivière avant et après l'implantation des déflecteurs de courant. Ils remarquent que la quantité de poisson augmente suite à l'implantation des déflecteurs. Les auteurs attribuent l'augmentation des populations de poisson à l'amélioration de la qualité physique de l'habitat créée par les déflecteurs de courant tel que l'a proposé Tarzwell (1937).

Les travaux de restauration de rivières aux États-Unis sont basés sur les travaux que les Britanniques ont effectués au début du siècle. Par contre, peu de littérature scientifique d'avant 1930 provient d'Europe. Il existe néanmoins quelques auteurs européens ayant travaillé sur les problèmes de restauration des rivières. La majorité de ces publications portent entre autres sur les relations entre l'environnement des rivières et les problèmes d'ensemencement des espèces de poisson (Dick, 1873 ; Halford, 1903; Malloch, 1910; Walter, 1912 ; Mottram, 1928). Généralement, les études européennes du début des aménagements, sont plus concentrées sur les problèmes écologiques et biologiques de la restauration des rivières (e.g. prédation entre les espèces introduites, plantes aquatiques...)

1.3) Écllosion du mouvement de restauration des rivières

À partir de 1950, il y a eu une explosion du nombre de publications (Figure 1.2). En effet, à cette époque, le Congrès américain vote une loi, le *Dingle-Johnson Act*, qui impose une taxe spéciale sur tous les produits de pêche vendus aux États-Unis, les subsides étant remis pour la recherche sur la conservation de l'habitat du poisson.

En même temps, en raison de l'abondance de subventions pour les chercheurs, plusieurs programmes de restauration naissent un peu partout aux États-Unis. Les aménagements, d'abord populaires dans les états de l'Est et du Midwest, se propagent rapidement dans la région des Rocheuses. Cette éclosion donne naissance à de nouvelles techniques d'aménagement adaptées aux régions montagneuses où les rivières ont un comportement hydrologique différent. Par contre, cette croissance a eu des conséquences dévastatrices sur certaines rivières.

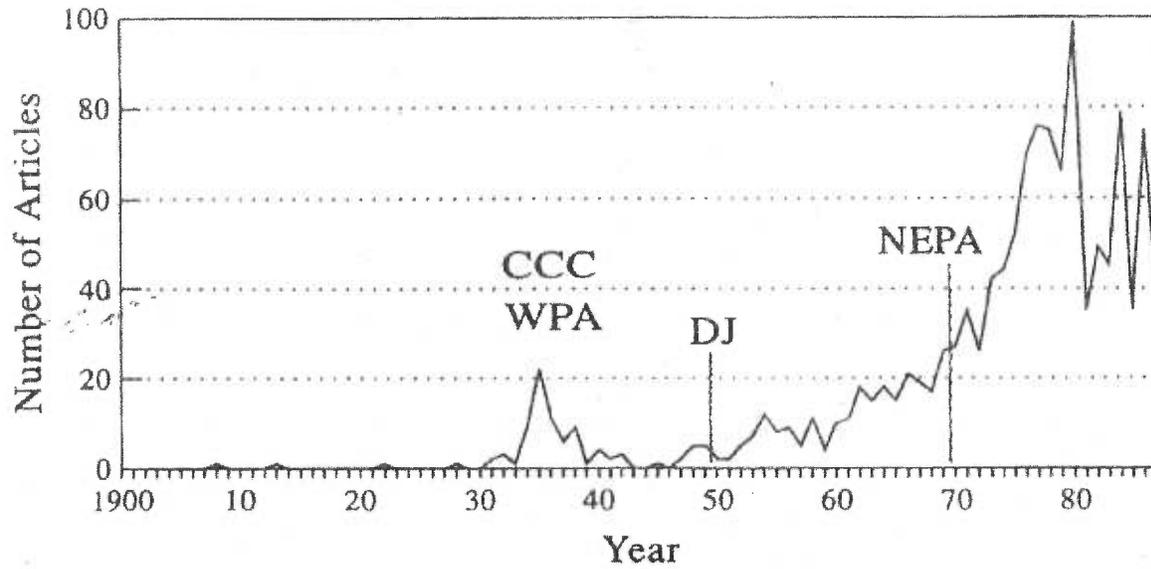


Figure 1.2 Évolution du nombre de publications depuis 1930. CCC= *Civilian Conservation Corps*, WPA= *Works Progress Administration*, DJ= *Dingle-Johnson act* de 1950, NEPA= *U.S. National Environmental Protection Act*. (Selon White, 1996)

En effet, à la suite de la publication d'un guide sur les techniques employées au Wisconsin par White et Brynildson (1967), la plus grande révolution dans le monde de l'aménagement des rivières pour l'habitat du poisson (Hunter, 1996), plusieurs structures décrites dans le guide ont été implantées dans les rivières des Rocheuses.

Les rivières des Rocheuses possèdent des caractéristiques qui sont tout à fait différentes de celles du Wisconsin et du Midwest en général. Ce sont des rivières majoritairement sous couvert forestier et les crues fréquentes sont parfois très violentes. Aussi, le substrat des rivières en milieu montagneux est généralement fait de gravier et de cailloux comparativement aux rivières très sablonneuses du Wisconsin. Les résultats ont été tels que les structures ne sont demeurées en place que quelques mois et ont été complètement détruites (White, 1996). Ces expériences peu fructueuses ont démontré aux chercheurs que le contexte des rivières est un élément important à considérer lors de l'implantation de structures.

Au cours des années 30, quelques expériences d'aménagement ont été pratiquées sur des rivières du Montana et du Wyoming. Pratiquement la totalité des structures sont restées en place et ont été fonctionnelles 10 ou 20 ans (Duff, 1982). Peu après, une période d'inactivité dans les travaux d'aménagements a fait en sorte que plusieurs structures se sont dégradées à cause du manque d'argent pour l'entretien. La période des années 1950-60 est marquée par le retour du mouvement de restauration des rivières dans l'Ouest américain. Plusieurs organismes fédéraux renouent avec les aménagements sur les rivières : le *U.S. Department of Agriculture, the Forest Service and Soil Conservation Service, the Bureau of Land Management* du *Department of the Interior, the U.S. Fish and Wildlife Service* et enfin la *U.S. Geological Survey*. La plupart publie des guides où ils exposent les techniques d'aménagement. En 1936, Le *U.S Department of Agriculture* publie le *Fish Stream Improvement Handbook*. Celui-ci est réédité en 1952, avec quelques améliorations. Par contre, le choix et l'implantation des structures relèvent plus de l'essai et de l'erreur que d'une planification réfléchie et rigoureuse (White, 1996). C'est une des raisons qui pousse White (1996) à dire que nous sommes encore dans la phase de l'apprentissage et que, par conséquent, la majorité des guides techniques ne peuvent plus être utilisés aujourd'hui. En 1956, Elhers publie une étude s'étalant sur une période de 18 ans sur

les effets des structures sur plusieurs rivières de la Californie qui avaient été aménagées durant les années 30. Cette étude est essentiellement qualitative: aucune donnée n'est utilisée pour appuyer les hypothèses. Il constate que plusieurs structures n'ont pas survécu aux 18 années en rivière. Parmi celles qui sont encore en place, plusieurs ne sont plus fonctionnelles, puisque la rivière les a contournées. Il remarque que le nombre de mouilles près des aménagements a diminué comparativement aux mesures prises lors de la période d'efficacité maximale des structures. Par contre, quelques structures subsistent encore et continuent d'être opérationnelles. Il remarque que les plus fonctionnelles sont celles où la végétation a permis une stabilisation de la structure.

Ehlers (1956) attribue donc l'efficacité à long terme des structures à la présence de végétation et à la stabilisation du système rivière-structure. Cette étude est très importante malgré le fait qu'elle ne démontre pas cette hypothèse de stabilisation. Elle permet, pour la première fois, de mettre en évidence le rôle de la végétation. Dans la majorité des techniques d'aménagement, la végétation prend une place très minime. Cette étude à long terme a permis de montrer que les structures ne peuvent à elles seules contribuer à l'amélioration de la qualité de l'habitat physique du poisson.

1.4) Les états du Mid-Ouest américain: le cas du Wisconsin

Même si le pôle de développement des aménagements se déplace vers l'Ouest américain, des États comme le Michigan et le Wisconsin progressent dans le développement de nouvelles techniques d'aménagement. En 1963, Le Département des ressources naturelles du Wisconsin décide de procéder à une évaluation scientifique des effets des aménagements sur l'habitat physique et sur le poisson. Le mandat est confié à Robert L. Hunt, un biologiste, qui choisit d'aménager la rivière Lawrence Creek dans le centre du Wisconsin afin de combler un manque de mouille. La première étape de la recherche a été de dresser des cartes morphologiques et sédimentologiques avant l'implantation des structures ainsi que d'effectuer des dénombrements des populations de poissons par pêche électrique. La deuxième étape a débuté trois ans après les travaux, soit en 1966 et visait à reprendre des levés

cartographiques pour évaluer les effets des aménagements. Les structures implantées dans la rivière sont des déflecteurs avec couvert (deflector bank cover) (Figure 1.3).

Ce type de structures a été développé au Wisconsin pour des rivières ayant un gradient de moyen à faible ainsi qu'un débit relativement stable sans crue majeure. Les cartes morphologiques et sédimentologiques ainsi que le dénombrement des populations de poisson ont été refaits selon la même méthode avant et après les travaux qui ont eu lieu en 1963. Les résultats de l'étude de Hunt (1969, 1971, 1976) montrent une nette amélioration de la qualité de l'habitat physique dans la rivière Lawrence Creek. Hunt (1969) a montré que les structures ont réduit l'aire totale de la rivière de 50%, ont provoqué une augmentation de la profondeur moyenne de 60% et une augmentation du nombre de mouilles de 52%. Il a aussi montré que la composition du substrat a changé considérablement. Les superficies du substrat composé de sable ont diminué de 40% et celle du gravier augmenté de 11% (Tableau 1.1).

Composantes	section A			Section B
	Avant	Après	% de changement	Sans travaux
Aire en acres	3.81	1.86	-51	3.15
Largeur moyenne (en pieds)	23	14.2	-38	24
Profondeur moyenne (en pouces)	4.9	8.1	65	6.7
Longueur de talweg (en pieds)	5631	5710	1	4525
Nombre de mouilles	188	286	52	275
Nombre de mouilles de plus de 2 pieds de profondeur	32	56	75	31
Aire des mouilles en pied ²	7288	19776	171	10722
Couvert permanent en pied	719	3709	416	750
% de l'aire en mouille	4	24	500	8
% des berges en couvert	5	27	440	6
Pieds ² du substrat de la rivière de:				
Sable	81082	48898	-40	69781
Silt	77559	23664	-70	50914
Gravier	7489	8305	11	16239
% du substrat de la rivière de:				
Sable	49	60	23	51
Silt	46	30	-35	37
Gravier	5	10	100	12

Tableau 1.1 : Changements morphologiques et sédimentologiques de la rivière Lawrence Creek avant et après les travaux d'aménagement (Hunt, 1969)

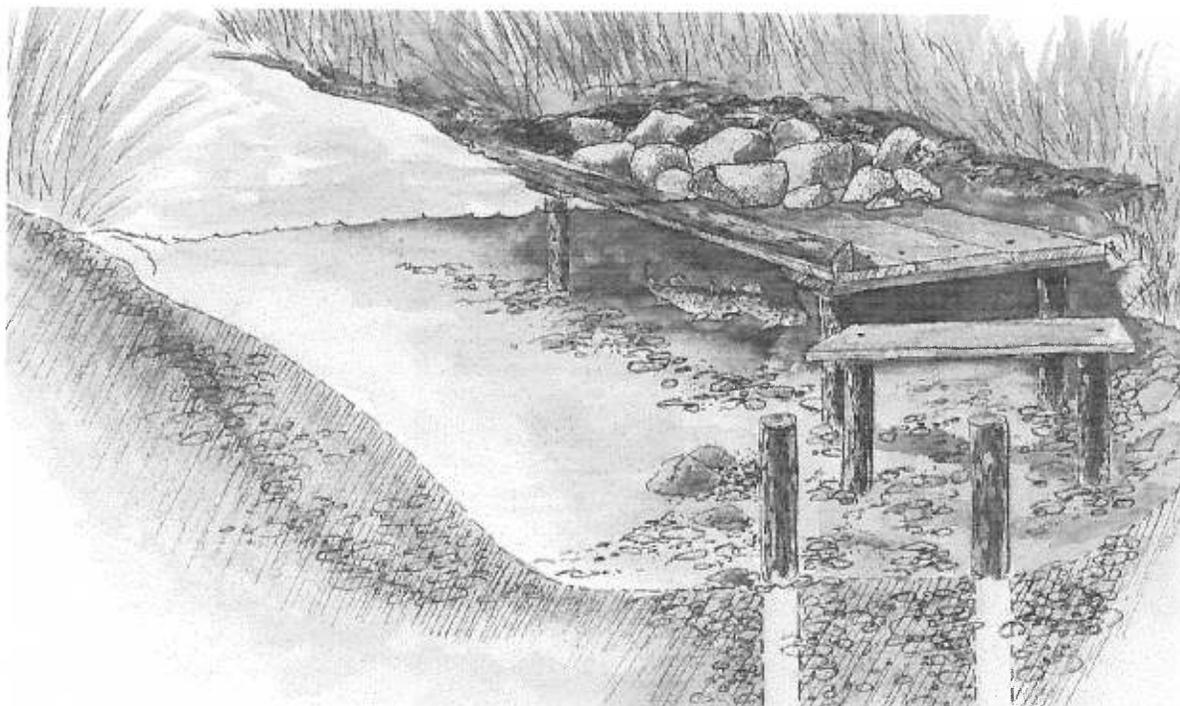


Figure 1.3 Déflecteur et couvert (deflector bank cover) installés sur la rivière Lawrence Creek au Wisconsin. (tiré de Hunt, 1993)

L'étude de Hunt (1969, 1971, 1976) voulait aussi montrer l'influence des structures sur les populations de truite mouchetée indigène (*Salvelinus fontinalis*). Après les travaux d'aménagement, le nombre de truites de 16 cm et plus a augmenté de 156%. La production naturelle annuelle de truites a aussi augmenté de 17%. Hunt (1969) indique que les aménagements ont contribué à une augmentation du taux de survie hivernal, un des facteurs les plus importants pour l'augmentation des populations de poisson. Le premier hiver est le plus important à cause de la compétition pour le couvert, pour la nourriture et pour la protection contre la prédation (Hunt, 1969 ;1971). Ainsi, en améliorant la qualité de l'habitat physique des salmonidés, leur chance de survie en hiver augmente (Hunt, 1969 ;1971).

En 1971, Hunt poursuit son analyse avec les données récoltées sur la rivière Lawrence Creek. Dans cette étude, il veut montrer la réponse directe des populations de poissons aux changements de l'habitat physique après les travaux d'aménagement. Contrairement à Shetter *et al.* (1949), Hunt (1971) dispose d'une quantité importante de données pour évaluer l'effet des aménagements. Il a montré, par des corrélations, que les deux facteurs les plus limitants (coefficient de corrélation élevé) au niveau de l'habitat physique avant les travaux étaient la superficie totale de mouilles ainsi que la longueur du couvert disponible. Les mêmes corrélations, faites avec les données après-travaux, montrent que les deux facteurs de l'habitat physique ne sont plus des facteurs limitants à cause de la faible corrélation entre ces variables et les populations de poisson (Figure 1.4). Avec cette étude, Hunt (1971) a montré l'étroite relation qui peut exister entre la qualité de l'habitat physique et les populations de poisson. Cependant, l'effet du changement dans la composition du substrat n'a pas été démontré.

En 1972, White publie les résultats d'une étude qu'il a menée sur la rivière Big-Roche-a-cri, au Wisconsin, à quelques kilomètres de la rivière Lawrence Creek, site d'étude de Hunt (1969, 1971, 1976). Cette rivière avait déjà été aménagée au cours des années 30 avec les techniques développées dans l'état voisin, le Michigan. Les structures installées à cette époque étaient des déflecteurs de courant. Lors de la prise de données avant-travaux sur la Big-Roche-a-cri, White (1972) retrouve les anciennes structures dans un état lamentable et non fonctionnel (Figure 1.5).

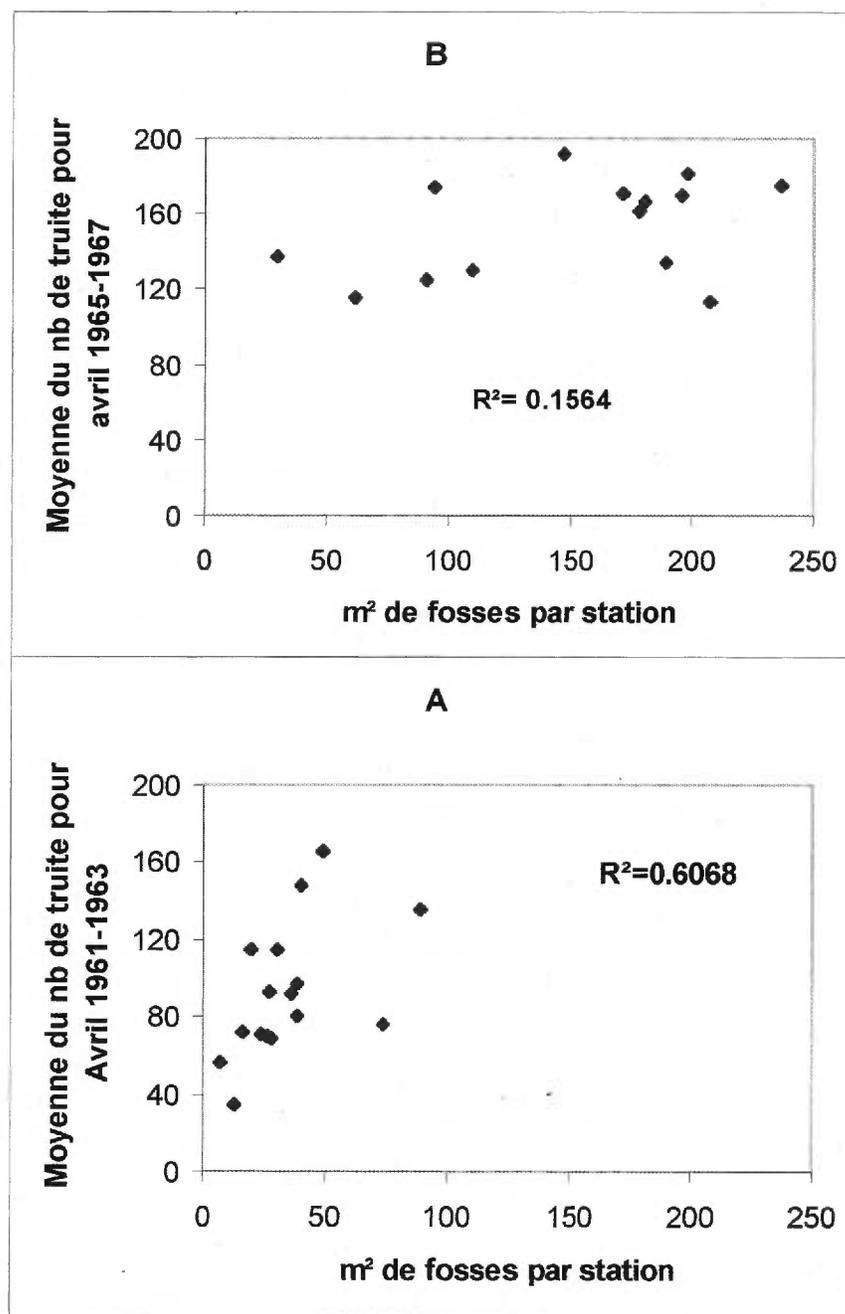


Figure 1.4 Corrélation entre l'aire des mouilles par station et la moyenne du nombre de truite A. Pour avril 1961-1963 (avant travaux) B. Pour avril 1965-1967 (après travaux) (Hunt, 1971)

A.



B.

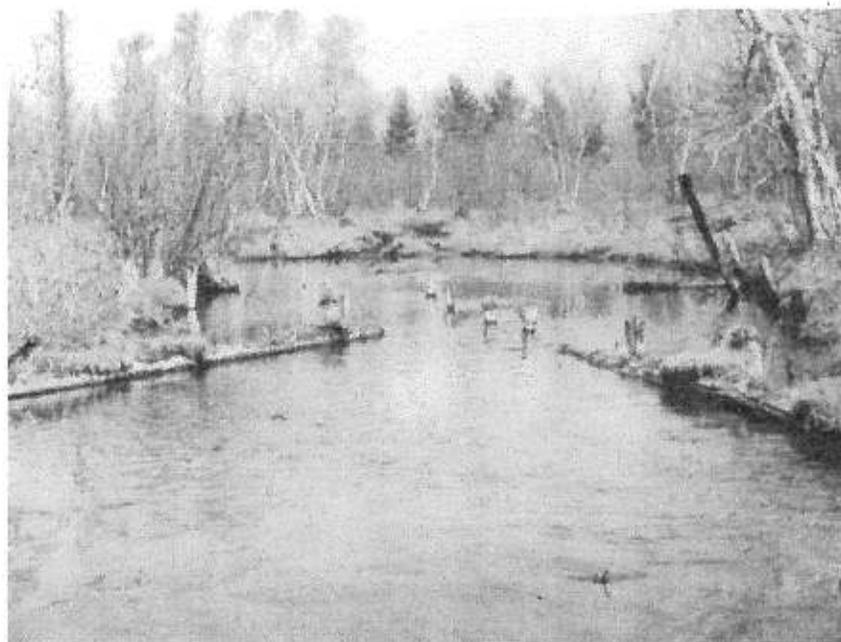


Figure 1.5 **A.** Structure des années 30 utilisée par les castors sur la rivière Big-Roche-a-cri Creek au Wisconsin. **B.** Déflecteur de courant des années 30 détruit sur la rivière Big-Roche-a-cri Creek au Wisconsin. (White, 1972)

Les déflecteurs sont utilisés par les castors pour produire des barrages, ce qui crée un impact important sur la diminution de la qualité de l'habitat physique du poisson (Butler et Malanson, 1994). Cette étude est intéressante parce qu'elle montre que les techniques utilisées dans les années 30 ont contribué à la détérioration à long terme de la qualité de l'habitat physique alors qu'elles avaient été évaluées comme étant très valables par les études antérieures (Tarzwell 1932, 1937; Shetter *et al.* 1949 ; Latta 1972). L'importance des études à long terme prend ici tout son sens.

White (1972) utilise pour son étude la même méthodologie que Hunt (1969, 1971, 1976) pour les variables biologiques. Les aménagements sont aussi effectués avec le même type de structures. Ainsi, les données biologiques des deux études ont pu être comparées, ce qui est rare à cause de la complexité des milieux et des variables qui sont souvent différentes. Les résultats de White (1972) sont sensiblement les mêmes que ceux obtenus par Hunt (1969, 1971). White (1972) remarque une amélioration de la qualité de l'habitat physique qui se traduit par une augmentation des populations de poissons. Pour estimer les effets sur l'habitat physique, White (1972) a utilisé les changements de la largeur du cours d'eau et du rapport profondeur/ largeur mesuré avant et après-travaux. Dans son étude, White (1972) ne peut attribuer directement les hausses dans les populations de poisson à l'implantation d'aménagements comme l'a fait Hunt (1971) à cause d'un manque de données et de contrôle sur les variables de l'habitat physique du poisson.

De plus, les données récoltées par White (1972) sur la rivière Big-Roche-a-cri montrent que l'augmentation du nombre de poissons n'est pas aussi significative que celle observée pour la rivière Lawrence Creek étudiée par Hunt (1969 ; 1971 ; 1976), malgré la proximité des deux sites. White (1972) attribue cette différence aux fluctuations des niveaux d'eau qui sont plus importantes sur la rivière Big-Roche-a-cri. L'étude de White (1972) permet de constater les différences qui peuvent exister entre les rivières même si elles ont été aménagées d'une manière similaire et qu'elles se retrouvent dans le même milieu.

L'étude sur la Lawrence Creek s'est poursuivie jusqu'en 1970. En 1976, Hunt publie les résultats de sept années supplémentaires d'inventaires biologiques de la rivière

Lawrence Creek. Cette fois-ci, Hunt (1976) veut démontrer l'effet à long terme des aménagements sur les populations de poissons. Il montre que le nombre de poissons n'a pas cessé d'augmenter depuis la mise en place des structures dans la rivière. Il attribue les résultats au taux de survie hivernal élevé tout comme il l'avait fait en 1969. Dans cette étude, Hunt (1976) ne discute pas les changements morphologiques et sédimentologiques à long terme de la rivière.

L'amélioration des connaissances sur les structures et sur leurs conséquences a permis à des chercheurs d'appliquer certaines techniques conçues pour un milieu particulier à un milieu différent. Après la parution du guide sur les techniques employées au Wisconsin par White et Brynildson (1967), plusieurs projets d'aménagement avaient vu le jour. Cependant dans un grand nombre de cas, les techniques n'étaient pas adaptées pour ces nouveaux milieux.

1.5) Connaissances et adaptation des techniques

La rivière Rapid Creek, au Dakota du Sud, est aménagée en 1977 selon une technique du Wisconsin. Les structures installées sont des déflecteurs avec couvert. Cependant, étant donné les caractéristiques physiques et hydrologiques très différentes des rivières du Dakota du Sud, les chercheurs ont modifié la technique (Hunter, 1996). Ils ont utilisé des blocs de béton plat (au lieu de planche de bois) pour réduire la largeur de la rivière afin d'augmenter les contraintes de cisaillement et par le fait même, d'augmenter le nombre et la profondeur des mouilles. Les structures ont aussi été conçues selon un profil bas permettant aux crues et aux glaces de passer sans les endommager et sans causer d'inondations (Hunter, 1996).

En 1986, Glover publie les résultats d'une étude qu'il a menée sur la rivière Rapid Creek. Il veut montrer les effets des aménagements sur les populations de truite brune (*Salmo trutta*). Glover (1986) montre que les aménagements avec des déflecteurs avec couvert ont contribué à faire augmenter, en 10 ans, les populations de truite brune (*Salmo trutta*) de 214%.

L'exemple de la rivière Rapid Creek montre que l'acquisition des connaissances permet d'adapter des techniques développées, suite à des recherches, à plusieurs milieux. Quelques années auparavant, à cause du manque de connaissances, l'adaptation des techniques était synonyme de désastre (White, 1996).

1.6) Importance des gros débris organiques dans les projets d'aménagement

Depuis le début des années 80, et encore aujourd'hui, une nouvelle école de pensée est apparue et s'impose de plus en plus dans les programmes de restauration: celle de l'importance des gros débris organiques (LWD : Large Woody Debris). Naiman *et al.* (1992) ont montré que les LWD affectent la forme de la rivière, le transport et de dépôt des sédiments ainsi que la composition et la dynamique de la communauté biotique.

Cette vision centrée sur le rôle des LWD provient en grande partie de la Côte Ouest des États-Unis où plusieurs rivières sont sous couvert forestier. Dans cette région, les rivières sont aménagées avec des matériaux simulant l'effet des LWD. House et Boehne (1985, 1986) ont montré l'effet sur la composition du substrat de structures placées pour imiter l'effet des LWD. Ils ont trouvé que la superficie du substrat de gravier, propice à la reproduction des salmonidés, avait augmenté de 20% sur une période de deux ans.

Cet engouement soudain pour les LWD date d'environ 20 ans. Toutefois, déjà dans les années 60, certaines techniques répandues au Wisconsin utilisaient ou simulaient les LWD (White et Brynildson, 1967; Hunt, 1993) avant même que les LWD soient étudiés en profondeur.

Plusieurs chercheurs ont tenté de comprendre le rôle fondamental des LWD sur l'habitat physique du poisson (House et Boehene, 1985, 1986; Andrus *et al.* 1988; Montgomery *et al.*, 1995). Beechie et Sibley (1997) et ont montré l'importance des LWD dans la formation des mouilles. Ils ont constaté que le pourcentage de la

superficie couverte par des mouilles était fortement corrélé avec le volume de LWD dans des rivières de pente moyenne. Dans les rivières de faible pente, ils ont trouvé que les mouilles étaient faiblement corrélées au volume de LWD. Cette faible corrélation s'explique par les mécanismes de formation des mouilles qui sont liés à autre chose qu'à l'abondance de LWD (Beechie et Sibley, 1997). Ceux-ci seraient liés aux pentes, à la largeur de la rivière ainsi qu'à la sinuosité des rivières (développement de méandres dans les rivières à faible pente).

C'est en ayant des connaissances fondamentales sur les LWD que l'on pourra les utiliser correctement dans les projets de restauration de l'habitat du poisson (White, 1996). Dans cette optique, Hildebrand *et al.* (1998) ont montré l'effet de l'orientation des LWD sur la morphologie de la rivière. Ils ont montré que certaines orientations des LWD, particulièrement celle avec un angle de 45° par rapport à la berge, causaient plus d'érosion et que certaines autres favorisant la création de zones de surcreusement plus propices aux salmonidés (Figure 1.6)

1.7) Le lien entre l'hydraulique et les aménagements

Peu d'études ont porté sur l'hydraulique dans les projets de restauration de l'habitat (White, 1996). Pourtant, la connaissance de l'hydraulique associée aux structures est un des facteurs de réussite (Hey, 1992, 1996 ; Hunt, 1993).

Au début des années 30, lors des premiers travaux d'aménagement, les chercheurs savaient quel était le comportement hydraulique de la rivière en présence de déflecteurs. Les déflecteurs produisent une accélération de l'écoulement de l'eau et, par le fait même, une augmentation de sa capacité à surcreuser le lit de la rivière (Tarzwell, 1931, 1937 ; Shetter *et al.*, 1949). Cependant, les chercheurs, très souvent des biologistes, ne se sont pas intéressés à documenter le comportement hydraulique près des structures. On constate que bon nombre de projets ne sont pas efficaces à long terme à cause du manque de connaissances des principes hydrauliques du cours d'eau et des processus d'écoulement (Hunt, 1988).

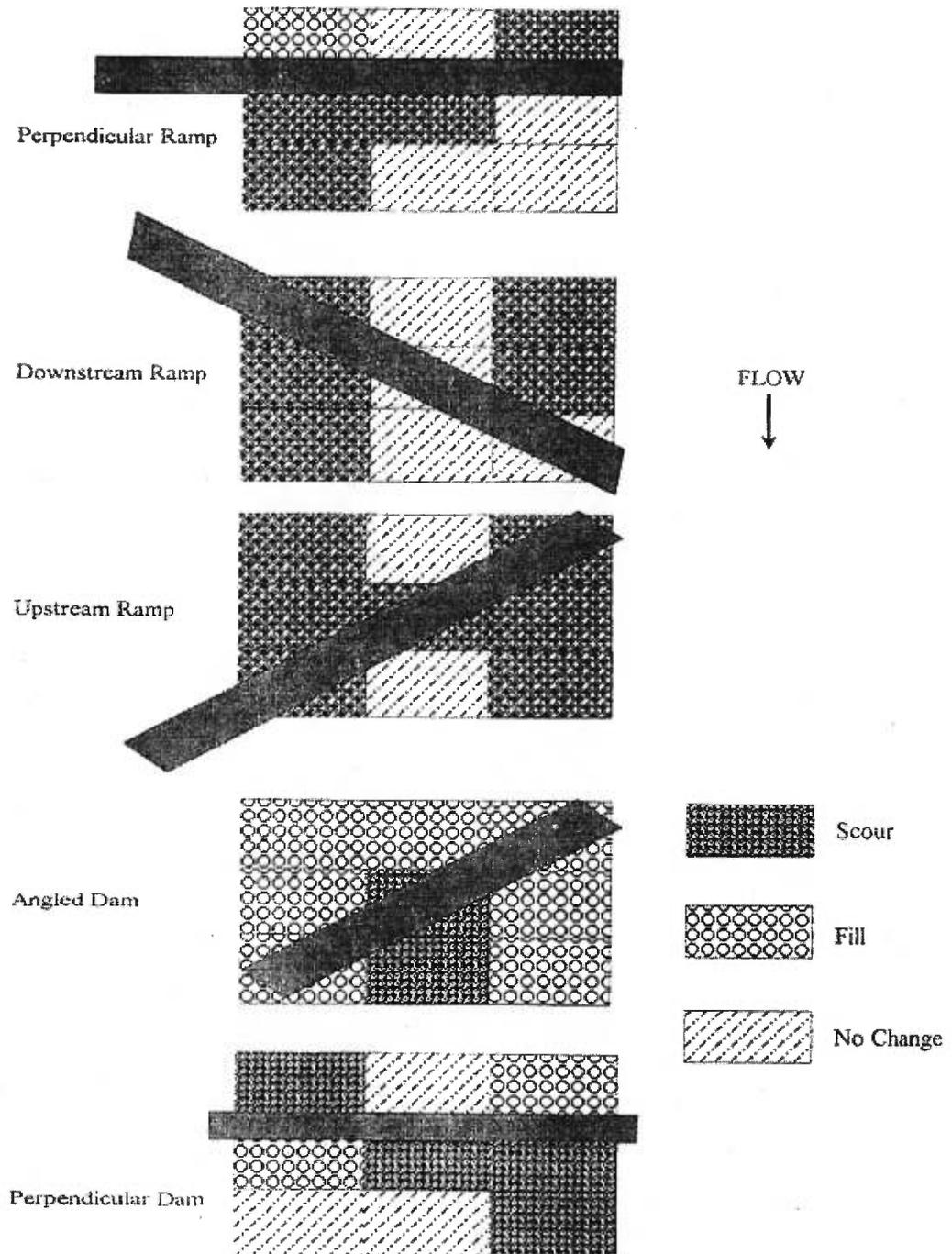


Figure 1.6 Changements morphologiques selon l'orientation des gros débris organiques (Hildebrand *et al.*, 1998)

L'habitat doit être défini par la dynamique fluviale afin que la restauration puisse être complémentaire des forces hydrauliques naturelles (Rabeni et Jacobson, 1993). Avec la compréhension des processus géomorphologiques naturels ainsi que des forces agissant dans les rivières, il serait possible d'effectuer des restaurations très efficaces et peu coûteuses de l'habitat du poisson (Rabeni et Jacobson, 1993).

Une des structures les plus utilisées, les déflecteurs de courant, possèdent une fonction simple. Cette structure accélère l'écoulement en forçant l'eau à travers une section rétrécie de la rivière. Cela engendre un surcreusement local du lit en aval du déflecteur et la formation de bancs d'accumulation (Hey, 1992 ; 1996). Les déflecteurs de courant peuvent prendre différentes formes. Les déflecteurs en Y (Figure 1.7, C (Y)) et en V (Figure 1.7, C (V)) concentrent l'écoulement et produisent un surcreusement du lit. Les niveaux d'eau d'une rivière peuvent changer d'une saison à l'autre et dans le temps. Ainsi durant une période de crue, les déflecteurs en Y et en V seront submergés et l'écoulement sera dirigé vers les berges créant ainsi de l'érosion de berge assez sévère. Cette érosion de la berge est causée par les courants d'écoulement secondaire qui sont générés lorsque l'eau passe par-dessus la structure (Hey, 1992 ; 1996). Pour la majorité des structures, les courants d'écoulement secondaire sont responsables du surcreusement du lit ou de l'érosion de berges (Hey, 1992 ; 1996).

La connaissance générale des patrons d'écoulement ne suffit pas à comprendre le rôle des structures sur les processus fluviaux. Il faut aussi étudier plus en profondeur la nature même de l'écoulement pour pouvoir la mettre en relation avec l'habitat physique du poisson. Les courbes de préférence d'habitat du poisson selon des variables hydrauliques telles les profondeurs et les vitesses pourraient être utilisées dans cette caractérisation. Présentement, peu d'études ont utilisé l'hydraulique pour caractériser l'habitat physique. Bouckaert et Davis (1998) ont utilisé des mesures de vitesse d'ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) pour caractériser l'habitat des macro invertébrés autour d'un gros bloc situé dans un seuil de rivière. Avec leurs données, ils ont estimé le cisaillement ainsi que l'intensité turbulente. Ils ont montré que la faune benthique macro invertébrée était plus riche en arrière de l'obstacle à cause de l'intensité turbulente plus importante (Figure 1.8).

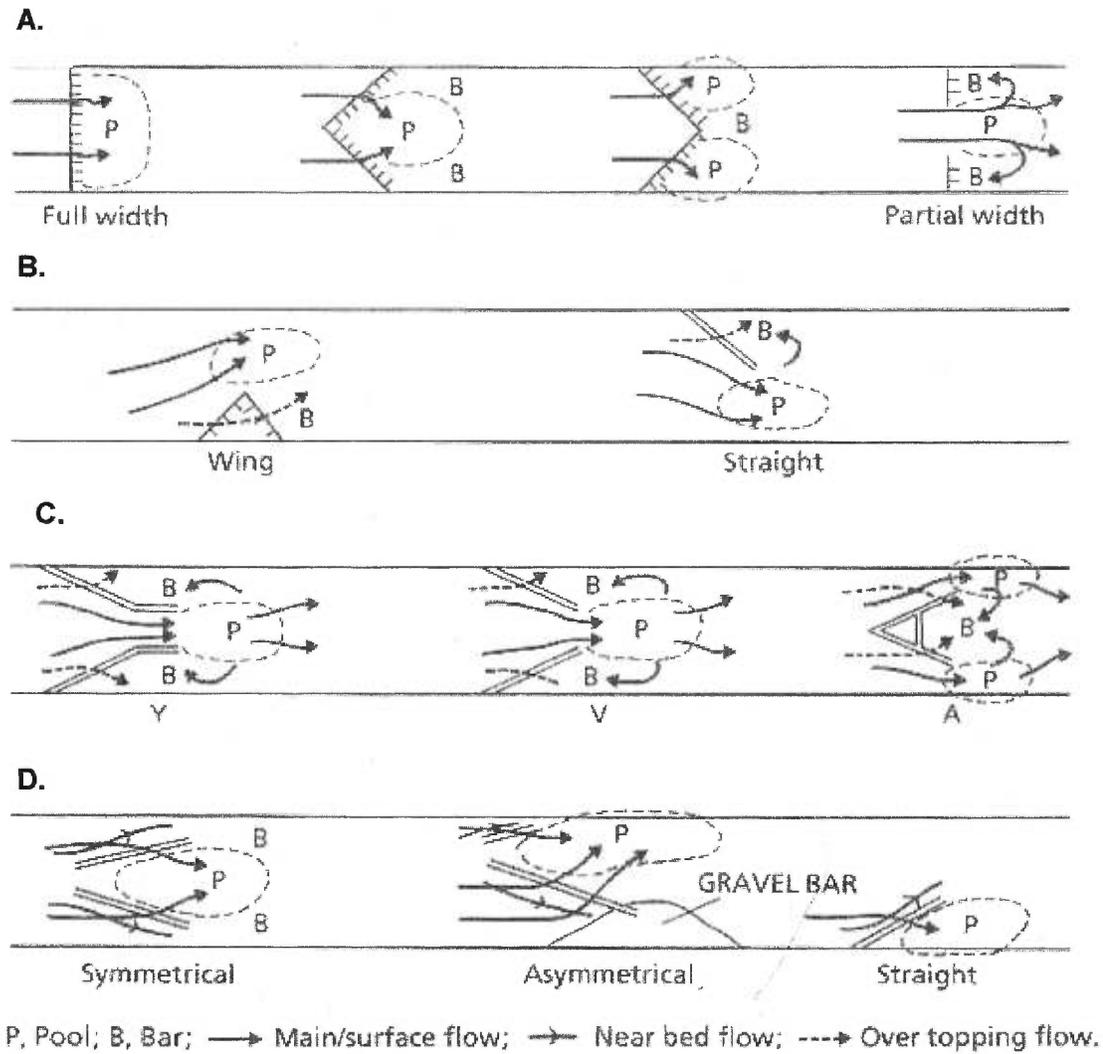


Figure 1.7 Forme de différentes structures, lignes d'écoulement à différents niveaux d'eau et effets sur la morphologie du lit de la rivière (Hey 1996).

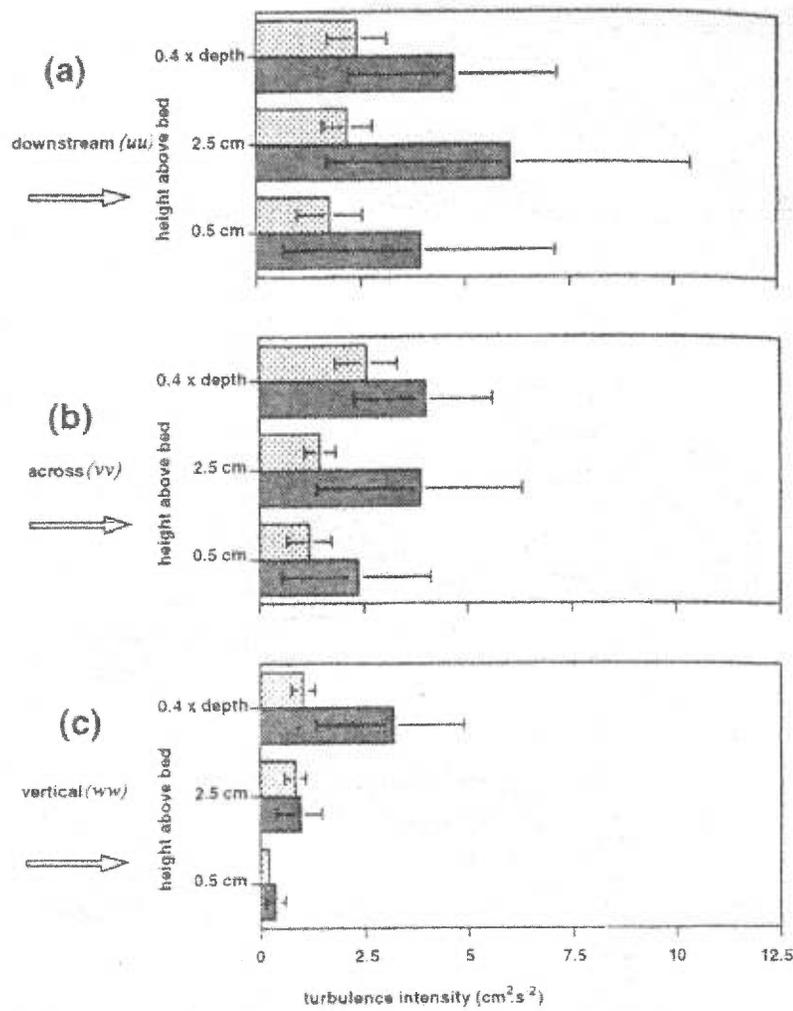


Figure 1.8 Intensité turbulente moyenne a) longitudinale b) latérale et c) verticale à trois hauteur au-dessus du lit. Les barres pleines = en aval de l'obstacle et barre pointillées = en amont de l'obstacle (selon Bouckaert et Davis, 1998)

Cette intensité turbulente entraîne le dépôt des particules de matière organique à l'arrière de l'obstacle et favorise l'échange des gaz en solution (Bouckaert et Davis, 1998). Ainsi, un meilleur habitat pour les macro-invertébrés est un bon habitat pour les salmonidés à cause de la quantité de nourriture disponible.

Dans la caractérisation de l'habitat physique du poisson en rivière, il devient important de connaître la dynamique de l'écoulement près des structures afin de mieux comprendre leur rôle et d'arriver à installer des structures pouvant recréer des conditions hydrauliques et hydrologiques stables qui vont maintenir la qualité de l'habitat. Par exemple, Paice et Hey (1989) ont montré que l'hydraulique, par le contrôle des courants secondaires dans un méandre, pouvait mener à la stabilité de la rivière. Ils ont installé des structures dans un méandre de manière à créer des courants secondaires artificiels dans le sens opposé aux courants secondaires naturels des méandres. Ainsi, une certaine stabilité s'est établie dans le transport des sédiments, les vitesses et la morphologie de la rivière (Figure 1.9) (Paice et Hey, 1989).

1.8) Réalisme des résultats obtenus avec des aménagements

Dans la vaste littérature qui existe sur les habitats du poisson en rivière, très peu d'articles ou de rapports portent sur des cas dont les résultats sont peu significatifs ou exhibent l'absence de relation entre les variables. Généralement, les résultats qui sont publiés montrent des gains importants pour l'amélioration de la qualité de l'habitat physique du poisson. En science, l'apprentissage se fait aussi par les échecs. Il est impossible de penser que tous les projets de restauration entrepris dans le monde aient conduit à des succès. Il est fort probable que cet état de fait soit lié au manque d'études à long terme. La recension des écrits a permis de voir que la majorité des études ont été réalisées à court terme. Implicitement, les résultats seront presque toujours très bons quelques années après l'implantation, puisque les processus d'ajustement des cours d'eau se font sur une période beaucoup plus longue et que l'évolution des populations de poisson est beaucoup plus rapide. L'importance d'entreprendre des études à long terme devient claire, surtout lorsqu'il s'agit de grandes rivières où les aménagements sont onéreux.

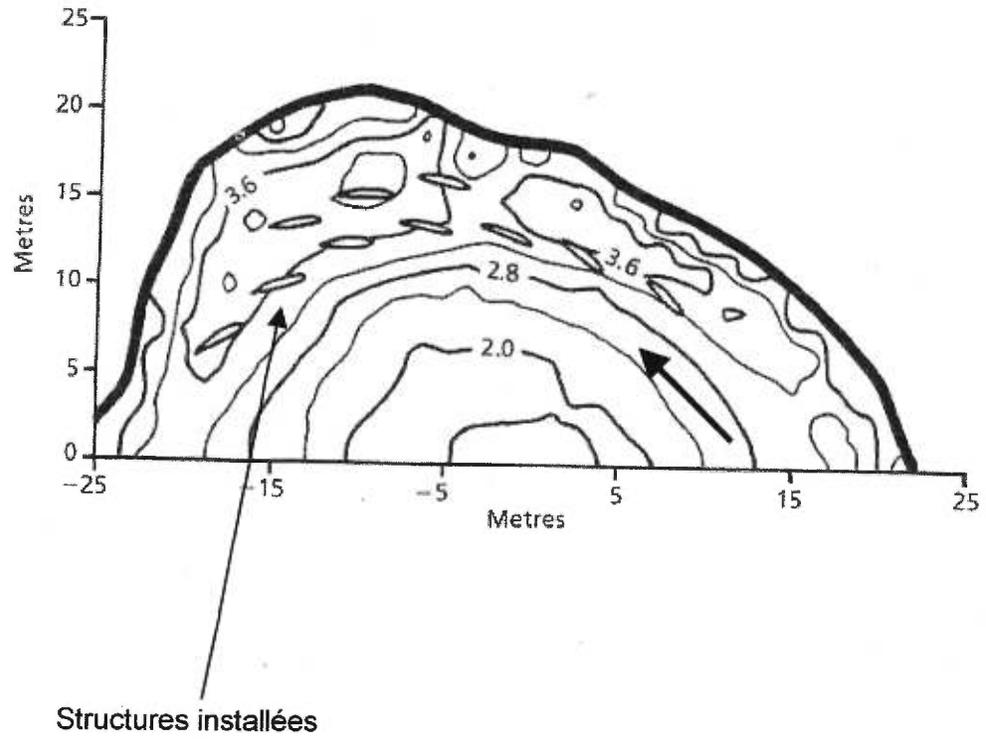


Figure 1.9 Topographie d'un méandre après l'installation de structures (Paice et Hey, 1992)

Chapitre 2

PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODOLOGIE

2.1) Problématique et objectifs

La recension des écrits a fait ressortir les lacunes dans les études menées sur la restauration de l'habitat physique du poisson. La méconnaissance à long terme des effets géomorphologiques et sédimentologiques des structures introduites en rivière est une de ces lacunes. La grande majorité des études ont été menées à court terme et elles étaient axées sur la biologie plutôt que sur la géomorphologie fluviale. La difficulté de trouver un site d'étude inchangé (en terme de travaux) sur une longue période de temps ainsi que l'enthousiasme des chercheurs face à des résultats positifs sur de courte période de temps sont probablement des causes importantes du faible nombre d'études à long terme.

La deuxième lacune importante des études menées est la méconnaissance de la dynamique de l'écoulement près des structures. Les profils de vitesse, le cisaillement ainsi que la turbulence ont rarement été documentés dans des projets de restauration de l'habitat. Pourtant, il s'agit d'informations cruciales faciles à obtenir.

En intégrant l'hydraulique dans la caractérisation de l'habitat physique du poisson, on peut avancer une hypothèse de recherche. Les aménagements contribuent à la stabilisation de la rivière qui se reflète dans l'ajustement entre le tracé du cours d'eau, les formes du lit de la rivière, les sédiments ainsi que le champ de vitesse. C'est cette stabilisation qui entraîne un comportement prévisible de la rivière et qui contribue à l'efficacité des aménagements sur l'habitat physique du poisson.

Pour répondre aux questions soulevées, cette recherche a pour principaux objectifs :

- 1) d'évaluer les effets à long terme des aménagements sur la morphologie et la sédimentologie de la rivière,
- 2) d'identifier les causes et la dynamique des changements et
- 3) de décrire et quantifier la dynamique de l'écoulement dans une section de rivière aménagée.

Pour ce faire, cette étude s'appuie sur une vaste recherche menée par Hunt (1969; 1971; 1976) sur les effets biologiques et

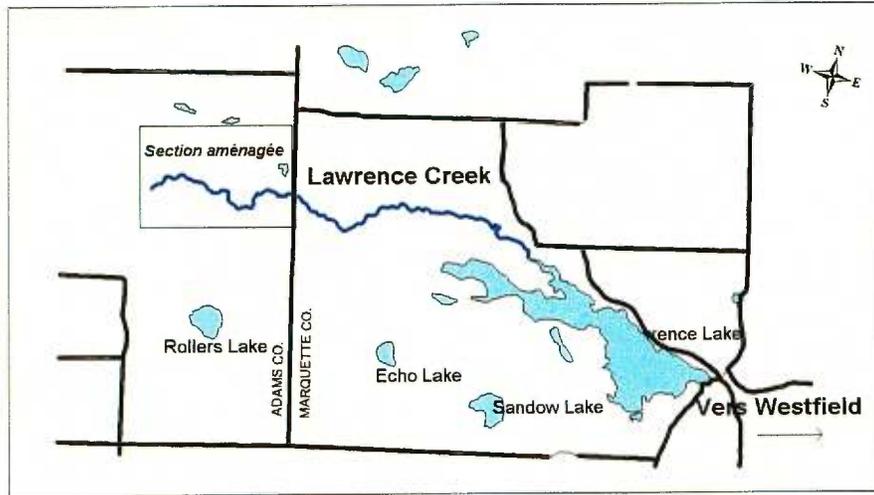
géomorphologiques de l'implantation de structures sur la Lawrence Creek au Wisconsin. Lors de cette recherche, des données biologiques et morphologiques ont été recueillies avant l'implantation des structures et trois ans après. Les recherches de Hunt (1969,1971,1976) visaient principalement à documenter les effets à moyen terme des structures sur les populations de truite mouchetée (*Salvelinus fontinalis*) et des relations pouvant exister entre les populations et le changement dans l'habitat physique du poisson.

Cette étude, en complémentarité avec celles de Hunt (1969, 1971, 1976), portera sur le rôle des structures dans la dynamique à long terme de la rivière. Les relations ne seront pas de nature biologique, mais plutôt géomorphologique et hydrologique. La dimension temporelle prendra aussi une importance capitale dans l'analyse des relations. L'originalité de cette recherche réside dans l'intégration de plusieurs composantes de l'habitat physique traditionnellement traitées de manière distincte. Chacune des composantes sera inter reliée dans la caractérisation de l'habitat physique du poisson.

2.2) Description de la rivière à l'étude

La Lawrence Creek (Figure 2.1 a) se situe dans le centre de l'état du Wisconsin aux États-Unis, à environ 150 km au sud-ouest de Green Bay et à 90 km au nord de Madison (Figure 2.1 b). La rivière coule dans les comtés de Adams et de Marquette sur une longueur totale de 12 km. L'État du Wisconsin a été englacé durant la dernière période glaciaire. Le territoire du Wisconsin est une vaste plaine d'épandage proglaciaire et de dépôts morainiques ponctuée de plusieurs moraines terminales (Figure 2.2). Ce contexte géomorphologique fait en sorte que les rivières du centre de l'État ont un substrat essentiellement composé de sable et dont l'alimentation en eau se fait par la nappe phréatique, ce qui lui donne un débit relativement constant durant l'année malgré des pics de crues associés à la fonte des neiges (Figure 2.3) (White, 1972). Le climat de la région (continental) est caractérisé par une température moyenne de -11°C en janvier et de 21°C en juillet. Les précipitations moyennes en janvier et juillet sont respectivement de 43 mm et de 86 mm.

A.



B.

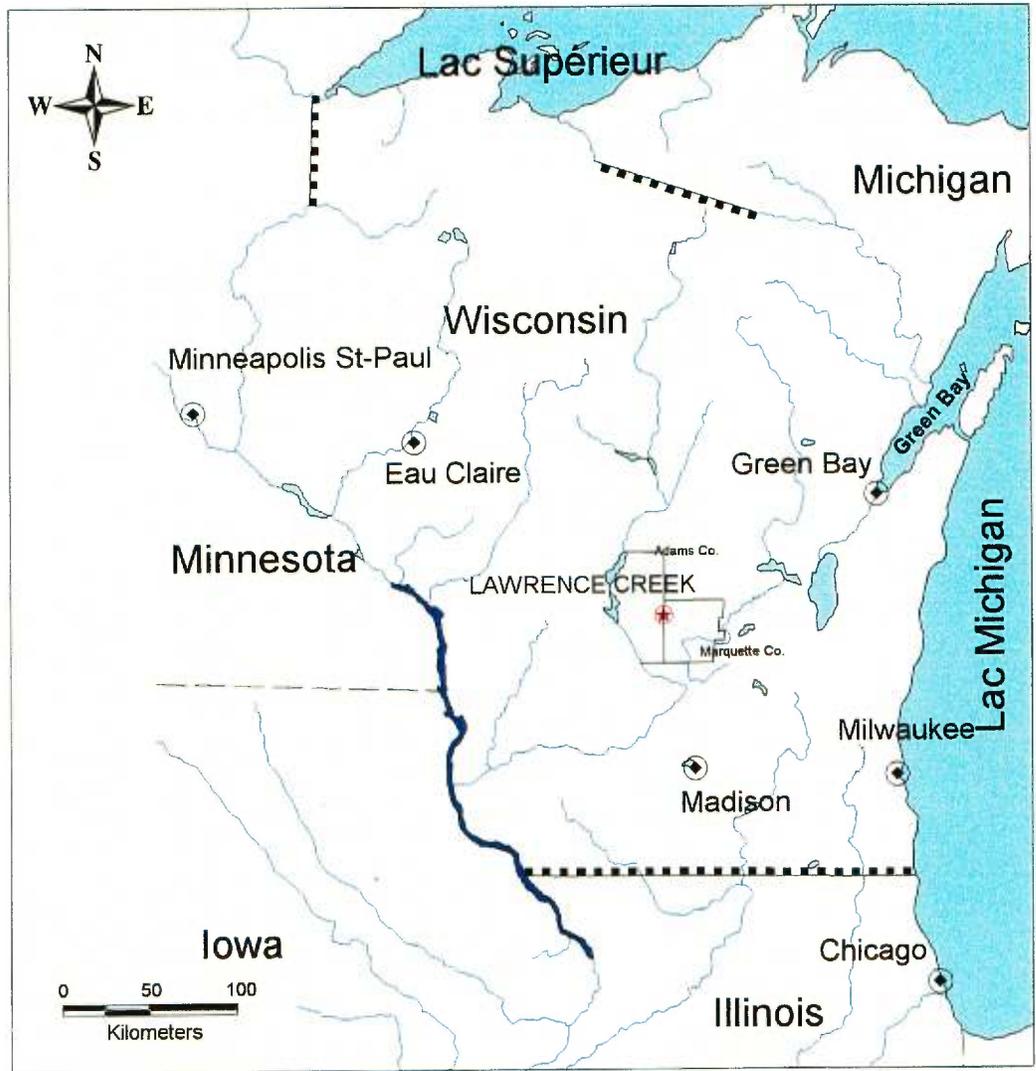


Figure 2.1 A. Lawrence Creek B. État du Wisconsin

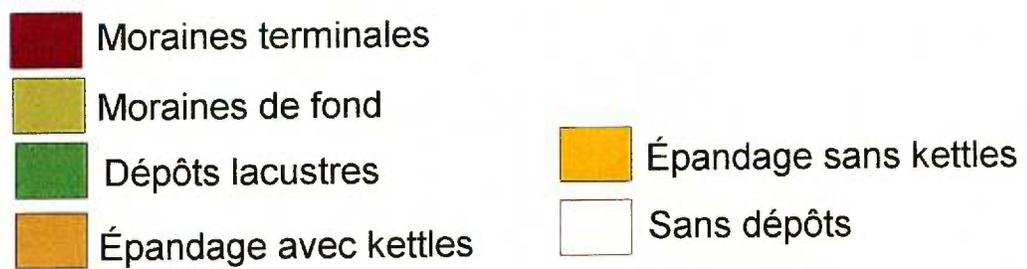
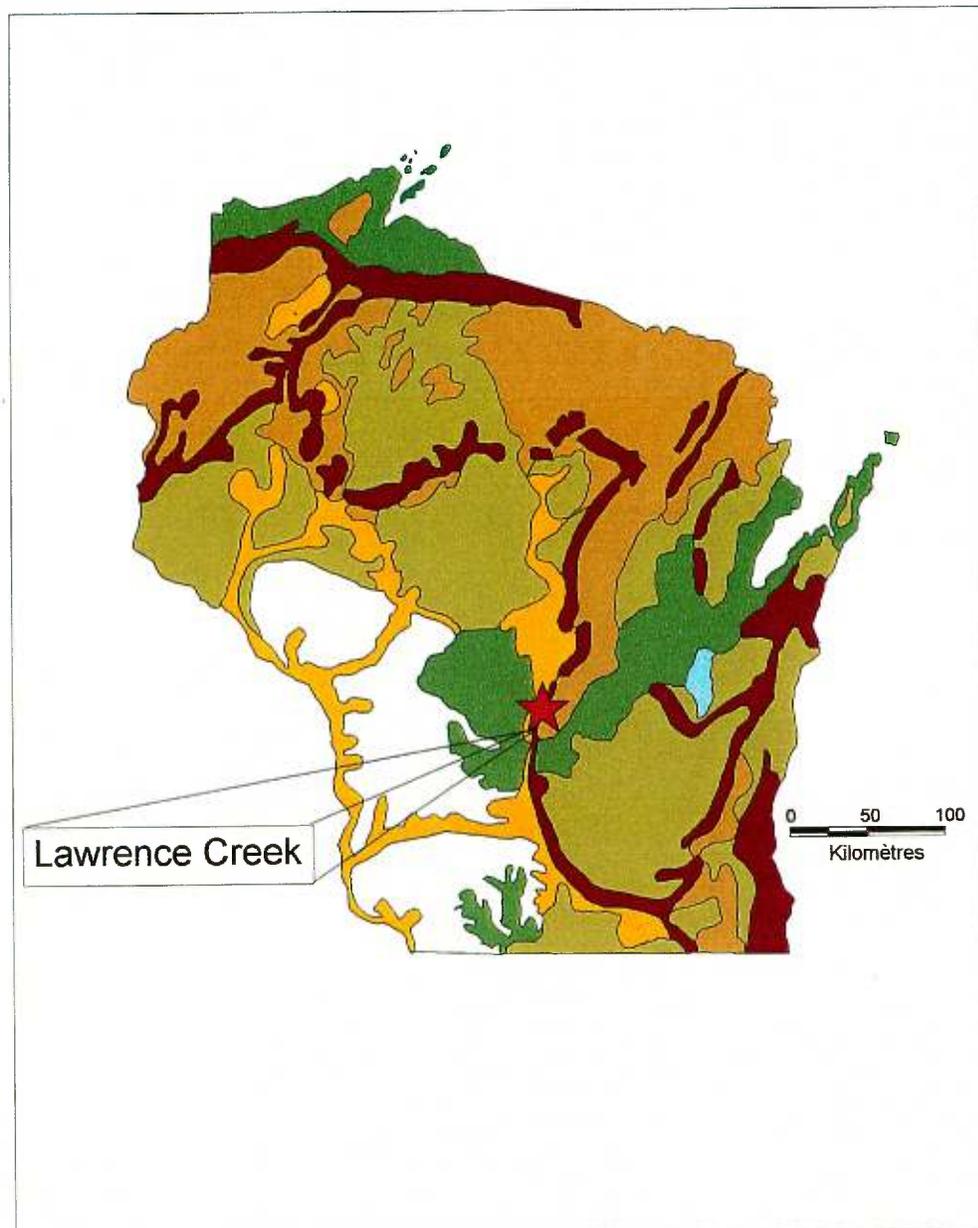


Figure 2.2 Contexte géomorphologique

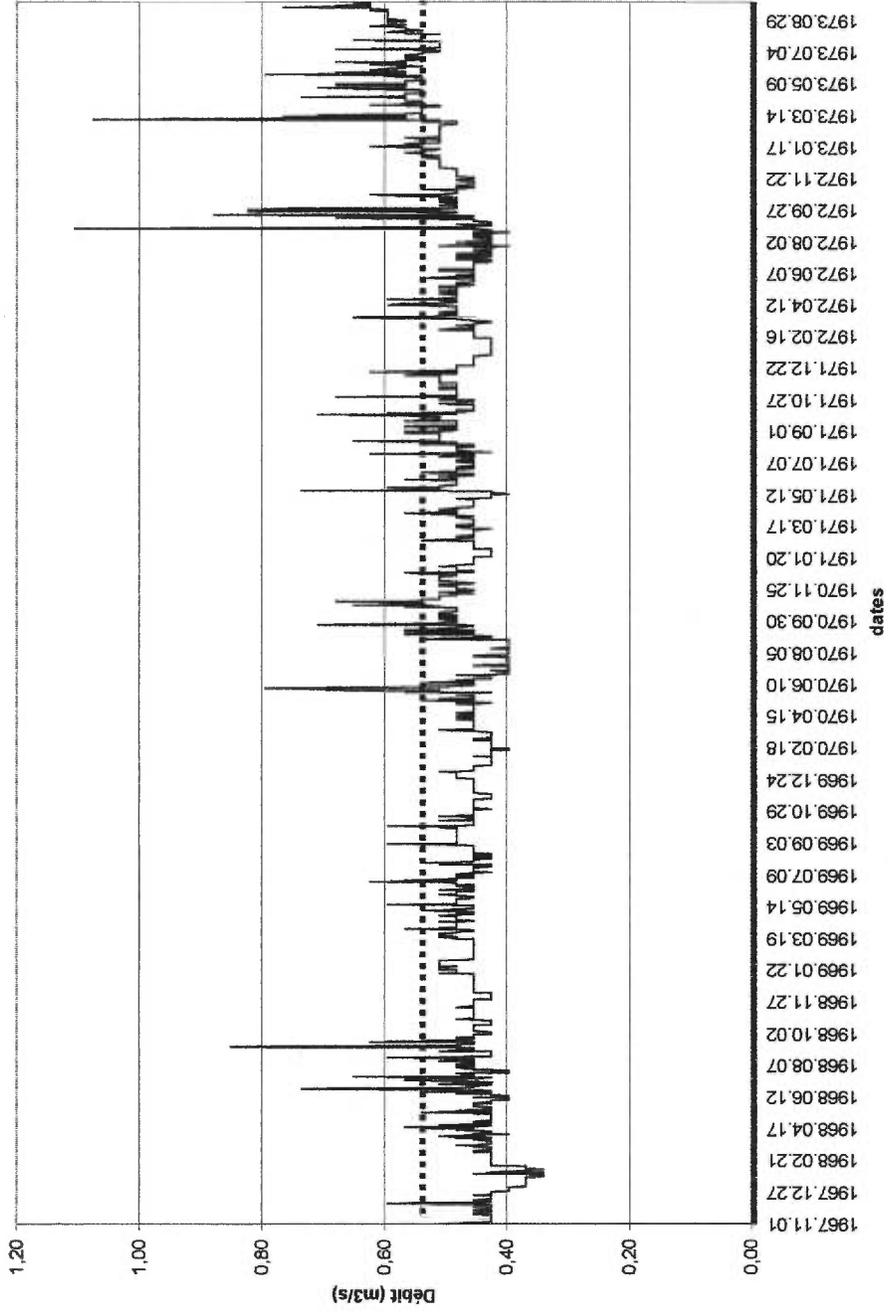


Figure 2.3 Débit journalier de la Lawrence Creek entre 1967 et 1973 (USGS, station n° 04072750) Débit lors de la prise de données

La Lawrence Creek est une rivière de pente modérée (environ 0,2%). Sa largeur moyenne, avant les travaux d'aménagement était de 7 m comparativement à une largeur moyenne de 4,3 m après les travaux d'aménagement (Hunt, 1969). La profondeur moyenne de la rivière, avant les travaux, était de 0,12m comparativement à 0,21m après les travaux (Hunt, 1969). La Lawrence Creek traverse deux ensembles géomorphologiquement distincts soit une moraine terminale ainsi qu'une plaine d'épandage fluvio-glaciare. Cette caractéristique sera importante lors des analyses des données de terrain.

2.2.1) Choix et historique du site

Étant donné notre objectif d'examiner les effets à long terme de l'implantation de structures sur l'habitat du poisson, nous avons choisi de travailler aux États-Unis parce qu'il y a une plus grande possibilité de trouver une rivière ayant été aménagée il y a plusieurs années. Au Québec, quelques rivières ont été aménagées récemment pour améliorer la qualité de l'habitat physique du poisson. La rivière Nicolet dans les Bois-Francs ainsi que la rivière Yamaska-Nord en Estrie en sont des exemples, mais les travaux n'ont débuté que vers le milieu des années 90.

L'État du Wisconsin comme territoire de prospection pour un site d'étude a été un choix judicieux. L'état du Wisconsin, dans le Mid-Ouest américain, possède une solide réputation quant à la qualité de son programme de restauration de l'habitat (White, 1996). De plus, il s'agit d'un état pionnier dans la conception de différentes techniques d'aménagement depuis plusieurs années (White et Brynildson, 1967; Hunt, 1993). Le Wisconsin est aussi un état où la presque totalité des projets sont financés par le Département des Ressources Naturelles du Wisconsin (WDNR). Ceci fait en sorte que plusieurs scientifiques travaillent à la qualité de ce programme (Hunt, 1988). La probabilité de trouver un site d'étude était donc plus importante que dans plusieurs autres états américains.

La Lawrence Creek possède plusieurs avantages. Le premier est que la rivière n'a pas fait l'objet de travaux d'aménagement ni d'entretien particulier depuis 1963 (Ed L. Avery, WDNR, *comm. pers.*). Cette caractéristique particulière de la rivière Lawrence

Creek est due au fait que le WDNR lui a conféré une vocation scientifique et de recherche en 1960. Cela permettra de comprendre les liens et les effets des différentes composantes du projet (dimensions temporelle, géomorphologique, sédimentologique, hydraulique et hydrologique). La Lawrence Creek a été aménagée en 1963. La perte d'habitat causée par les changements dans l'utilisation du sol ainsi que par l'agriculture a incité les responsables du WDNR à aménager la rivière tout en la soumettant à une étude scientifique rigoureuse afin de vérifier les liens existant entre les changements dans l'habitat physique de la truite mouchetée indigène (*Salvelinus fontinalis*) et l'évolution de sa population. Aussi, l'absence de tributaire permet d'isoler les effets morphologiques et sédimentologiques à long terme des structures.

En 1963, le WDNR décide d'implanter des structures de type déflecteur avec couvert (traduction libre de "deflector bank cover", voir Figure 1.3) afin d'augmenter la superficie du lit occupé par des mouilles ainsi que le couvert qui avaient été identifiés comme les principaux facteurs limitant pour les poissons. Le principe de ce type de structures, est de réduire la largeur de la section de rivière tout en permettant un accès aux poissons sous la structure qui constitue un abri. Les structures sont placées en alternance de chaque côté de la rivière de manière à utiliser la sinuosité naturelle d'une rivière. Ainsi, l'écoulement qui frappe une structure sera redirigé vers l'autre structure, placée sur la berge opposée. Les structures sont construites de manière à réduire artificiellement la largeur de la rivière en construisant une nouvelle berge. La construction de l'aménagement commence par identifier l'emplacement de la nouvelle berge, ensuite d'installer la structure de bois et de combler le vise avec de gros blocs et enfin de revégétalisation de la structure pour redonner un aspect plus naturelle à la nouvelle berge. Ce type de structure a été utilisé puisque qu'il semble adapté aux conditions hydrologiques et géomorphologiques de cette région (rivière à faible pente avec un débit relativement stable et avec un substrat de sable).

Lors de cette étude, Hunt et son équipe ont dressé des cartes très précises (échelle de 1 : 300) de la morphologie et de la sédimentologie de la rivière avant l'implantation des structures sur une longueur totale de 1,6 km. La section d'étude a été décomposée en 17 sections de 91,5 m chacune. Pour chaque section, une carte

représentant la situation avant l'implantation des structures a été dessinée. Trois ans après les travaux d'aménagement, soit en 1966, d'autres cartes ont été levées et tracées en utilisant les points de référence cartographique ayant servi pour les cartes de 1963. Les cartes de 1966 montrent la morphologie de la rivière ainsi que l'emplacement des structures (Figure 2.4). Aujourd'hui, la majorité des points de référence cartographique sont toujours en place ce qui permet de refaire une carte comparable à celles de 1963 et 1966.

2.3) Méthodes

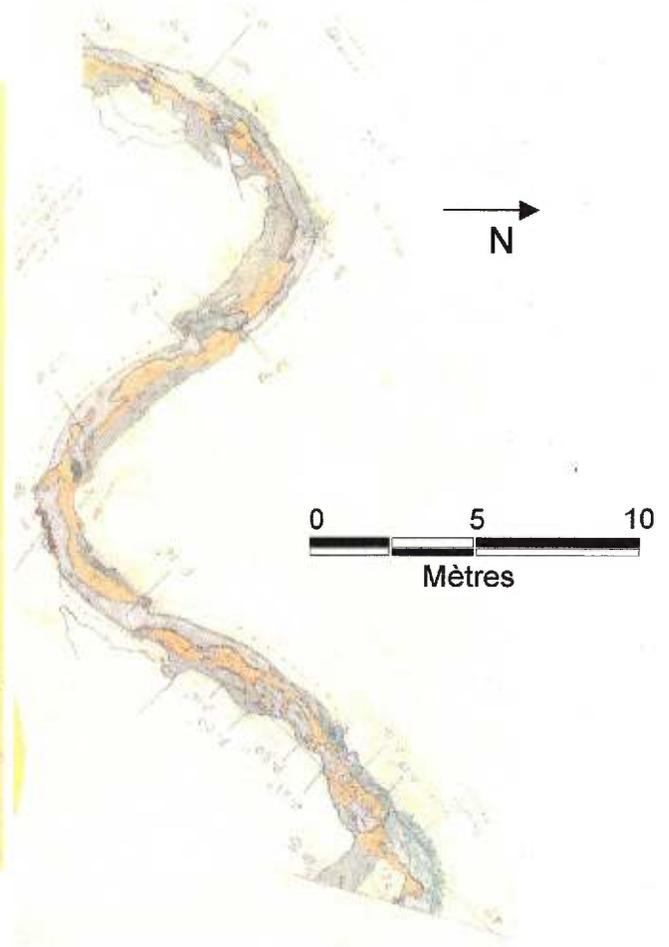
2.3.1) Collecte des données de terrain (données topographiques et qualitatives)

En avril 1999, de nouvelles données topographiques ont été recueillies sur le terrain. Le mois d'avril représentait le meilleur moment de l'année pour exécuter un levé topographique. Il s'agit de travailler avant que la riche végétation, caractéristique des rivières du centre du Wisconsin, ne confine l'écoulement et ne rende les relevés impossibles. La cohérence entre les cartes d'habitat était aussi plus élevée puisque les cartes de 1963 et de 1966 avaient été dressées lors de cette même période. Nous avons effectué les relevés topographiques à l'aide d'une station totale LEICA 805TL (Figure 2.5). La section d'étude s'étend sur 600m et traverse les deux sections géomorphologiques. Les contraintes de temps n'ont pas permis d'échantillonner les 1000 m suivant. Parasiewicz (1996) a montré que l'utilisation de données topographiques géoréférencées permettait une bonne représentation de la diversité des habitats dans une rivière. La présence en avril 1999 des points de référence du WDNR a permis de géoréférencer le relevé selon les cartes de 1963 et 1966. Lors du relevé topographique, le substrat était identifié et encodé selon les trois classes établies par le WDNR lors de l'étude de Hunt (1969), soit le sable, le gravier et le silt. De plus, les gros obstacles, les gros débris organiques et les structures étaient identifiées et encodées afin de pouvoir les localiser sur la carte.

La densité d'échantillonnage était de 1,75 point par m², permettant une bonne représentation du milieu étudié. Le choix des points à mesurer était basé sur les bris de pente observés sur le lit de la rivière. Étant donnée la relative simplicité du lit de la



A.



B.

Figure 2.4 A. Carte d'habitat de 1963 B. Carte d'habitat de 1966



Figure 2.5 Station totale Leica 805TL

rivière, les bris de pente étaient faciles à identifier. L'utilisation des relevés topographiques automatisés requiert des données qualitatives afin de garder un certain contrôle sur la représentation du lit de la rivière (Parasiewicz, 1996). Ainsi, un croquis détaillé de la section d'étude a été dessiné sur le terrain afin de guider la construction de la carte automatisée.

Lors du relevé topographique, les structures ont aussi fait l'objet d'un inventaire exhaustif. Chacune des structures a été classée selon sa condition physique et sa fonctionnalité (Figure 2.6). De plus, la profondeur du couvert disponible a été mesurée à plusieurs endroits le long des structures. Les trois catégories utilisées sont similaires à celles utilisées par Frissell et Nawa (1992). Les structures classées comme "*succès*" étaient des structures toujours en place, qui n'avaient pas bougé de leur position initiale et étaient toujours en fonction. Les structures classées comme "*moyennes*" étaient des structures dont les caractéristiques physiques ne correspondaient plus aux originales parce qu'elles s'étaient légèrement affaissées et que le couvert végétal sur le dessus de la structure était moins important. Ce type de structure était néanmoins fonctionnel, mais généralement, on y observait des accumulations de sédiments fins. Enfin, les structures classées comme "*échec*" étaient des structures complètement détruites et qui ne fonctionnaient plus. Généralement, les blocs ayant servi à la construction des structures se retrouvaient sur le lit de la rivière et une accumulation de silt remplaçait la structure.

2.3.2) Collecte des données de terrain (données hydrauliques)

Des données hydrauliques ont été recueillies sur le terrain en avril 1999 afin de caractériser la dynamique de l'écoulement près des structures. Pour quantifier l'hydraulique nous avons utilisé quatre vélocimètres électromagnétiques bidimensionnels (ECMS) de type Marsh-McBirney (modèle 523) (Figure 2.7). Chaque sonde possède deux paires d'électrodes permettant de mesurer la vitesse de l'écoulement selon deux composantes orthogonales. Chaque sonde produit un champ magnétique environ trois fois plus grand que le diamètre des sondes, ici le diamètre est de 1,3 cm. Lorsqu'un fluide conducteur passe à travers le champ magnétique, il induit

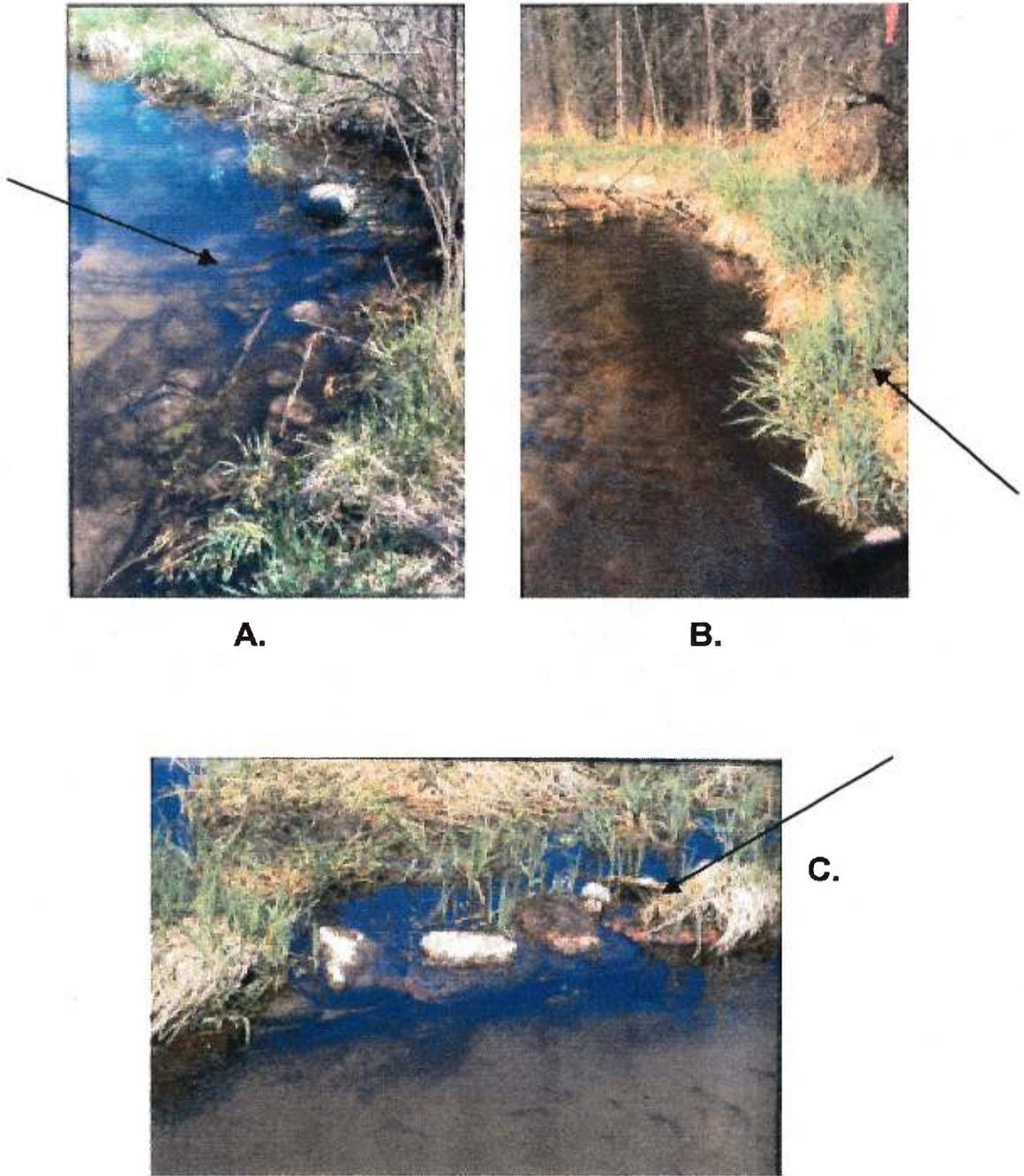


Figure 2.6 Condition physiques des structures A. « échec » B. « succès »
C. « moyenne »



Figure 2.7 Vélomètres électromagnétiques Marsh-McBirney (ECM)

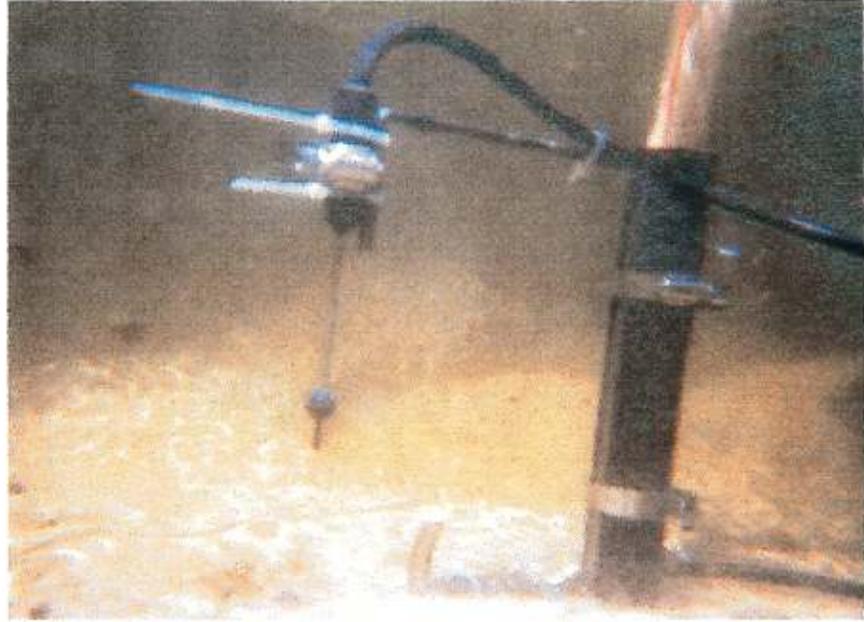
un voltage proportionnel à la vitesse de l'écoulement (principe de Faraday) (Clifford et French, 1993) Les voltages mesurés sont ensuite transformés en vitesse et emmagasinés dans un accumulateur de données de type Campbell, modèle 21X, pour être ensuite transférés vers un ordinateur portable. Il est important de mentionner que les appareils utilisés ont été calibrés en laboratoire avant d'effectuer des mesures sur le terrain. La calibration a été faite en utilisant un chenal d'écoulement dont le débit était stable et dont la vitesse moyenne d'écoulement était connue par l'utilisation d'un courantomètre à hélice. Aussi, la calibration de la vitesse moyenne zéro, a été produite en utilisant les courantomètres dans de l'eau stagnante.

Selon l'orientation des sondes dans l'écoulement, différentes paires de composante de l'écoulement peuvent être mesurées. Ainsi, il est possible de mesurer la composante longitudinale (u), verticale (v) et latérale (w) de l'écoulement, donc les paires uv , uw ou vw . La fréquence d'échantillonnage des ECMS était de 20 Hz, soit 20 mesures de vitesse par seconde. La durée d'échantillonnage a été établie à 60 secondes. Les données ont été filtrées avec un Filtre R/C qui élimine le bruit électronique). La constante de temps des ECMS est de 0,05s ce qui donne une demi-puissance de 3,18Hz.

Un des avantages des ECMS est qu'ils peuvent être utilisés selon plusieurs patrons d'échantillonnage. Le patron d'échantillonnage utilisé sur la Lawrence Creek permettait d'obtenir les trois composantes de la vitesse. Les quatre vélocimètres ont été installés sur deux tiges pliées en forme de "U" permettant de placer l'axe d'un premier vélocimètre à l'horizontale pour ainsi mesurer les vitesses u et v vélocimètre dont l'axe est à la verticale pour mesurer les vitesses u et w . Chacune des sondes était espacée de huit cm et les deux paires de sondes de 30 cm sur un tube en ABS pouvant être déplacé verticalement pour produire un profil de vitesse (Figure 2.8).

Les mesures hydrauliques ont été géoréférencées selon la méthode de Lane *et al.* (1998). La tige sur laquelle étaient montés les deux tubes d'ABS était dotée de deux prismes espacés de 15 cm et placés au sommet de la tige (Figure 2.9).

A.



B.



C.



Figure 2.8

A. Tige pliée en forme de U et deux ECMS **B.** Acquisition des données hydrauliques avec la tige géoréférencée et **C.** Stockage des données dans l'accumulateur et transfert vers l'ordinateur portable

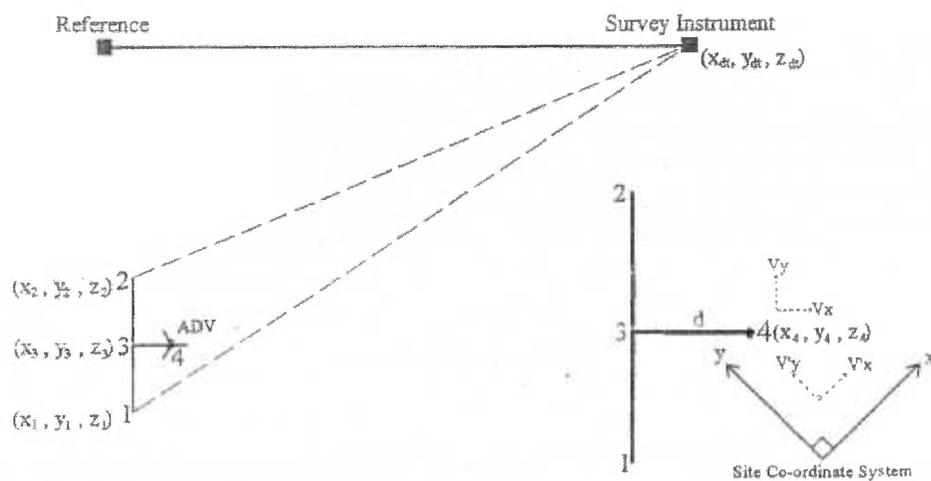


Figure 2.9 Principe de géoréférencement des mesures de vitesses
(tiré de Lane *et al.* 1998)

Avec la station totale, l'enregistrement des coordonnées des deux prismes (X_1, Y_1, Z_1 et X_2, Y_2, Z_2) permet de connaître la position centrale, c'est-à-dire l'endroit où se trouvent les deux tiges (X_3, Y_3, Z_3). Cette position peut être trouvée en utilisant l'équation :

$$x_3 = \frac{x_1 + x_2}{2}; y_3 = \frac{y_1 + y_2}{2} \quad (1)$$

L'angle horizontal entre 3 et 4 est calculé par l'équation :

$$\beta_{34} = \beta_{12} + \frac{\pi}{2} = a \tan\left(\frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1}\right) + \frac{\pi}{2} \quad (2)$$

Ensuite, en connaissant la distance (d) entre cette position centrale et les sondes, les coordonnées X et Y (du relevé topographique) des sondes (X_4, Y_4) peuvent être trouvées en utilisant l'équation :

$$x_4 = y_3 + d \sin \beta_{34} \quad (3a)$$

$$y_4 = y_3 + d \cos \beta_{34} \quad (3b)$$

Les données hydrauliques ont été prises dans une section comportant une série de structures en bon état placées en alternance de chaque côté de la rivière. La section d'étude mesurait 30 m avec une largeur moyenne de trois m (Figure 2.10). Nous avons mesuré le long de cinq coupes transversales. Les coupes ont été choisies selon la position des structures qui guident l'écoulement à travers la section. Le long de chacune des coupes, 4 à 6 profils de vitesse ont été réalisés. La profondeur moyenne le long des coupes était d'environ 50 cm dans la partie la plus profonde et d'environ 15 cm dans la partie opposée moins profonde. Ainsi, pour les profils de vitesse dans les zones profondes, cinq à six déplacements verticaux ont été faits comparativement à deux ou trois pour les parties les moins profondes.

Le long d'un profil, la vitesse longitudinale a été mesurée pour tous les déplacements et pour toutes les hauteurs au-dessus du lit.

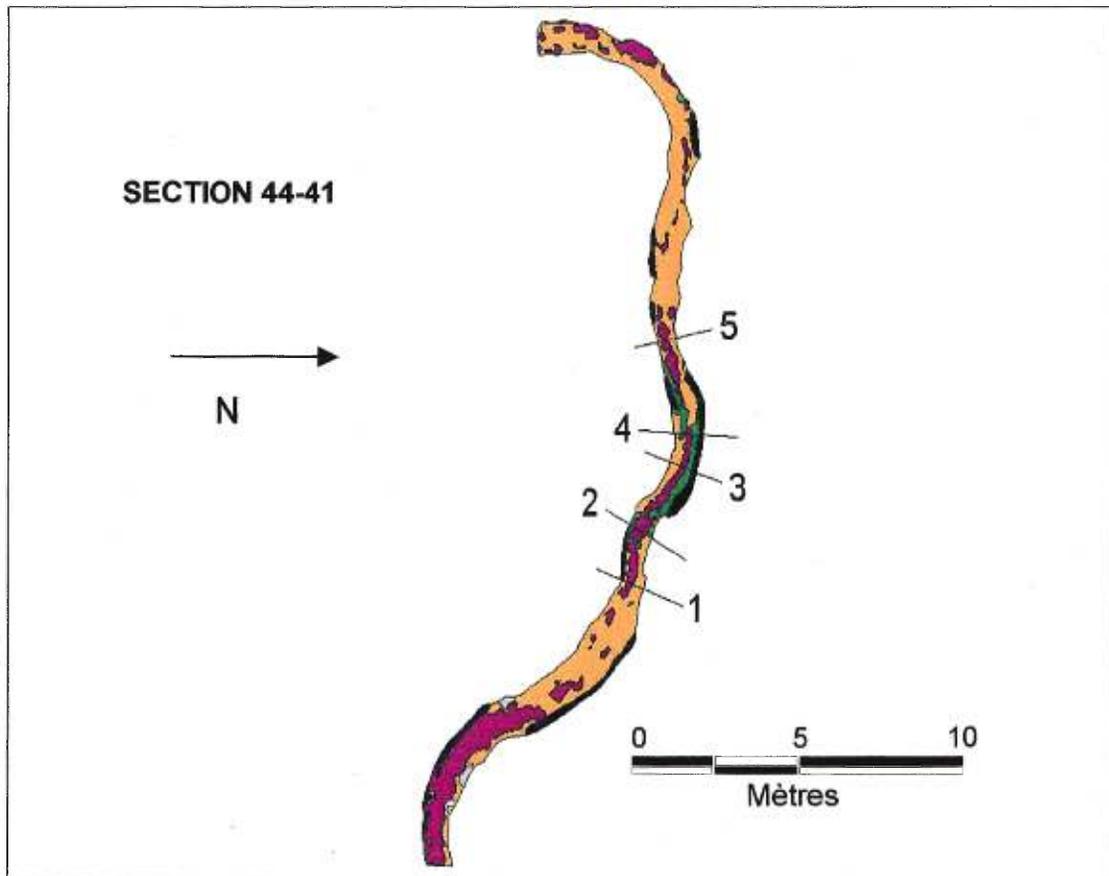


Figure 2.10 Localisation des coupes transversales

Pour la vitesse verticale, un seul ECM enregistrait tandis que deux vélocimètres mesuraient la vitesse latérale (Figure 2.11). L'échantillonnage des mesures de vitesse s'est fait de manière à couvrir le plus possible la largeur de la section. Par contre, près des structures il était difficile d'échantillonner à cause de la fragilité des appareils de mesure. Il était aussi impossible d'échantillonner sous les structures en raison de l'espace assez réduit.

2.3.3) Techniques d'analyse

2.3.1) Analyse des documents historiques

L'analyse de l'habitat physique de la rivière Lawrence Creek repose en grande partie sur des documents historiques fournis par le WDNR. Avant de débiter, nous avons fait des tests sur la validité des documents. Les cartes d'habitat de 1963 ont été soumises à un test sur la déformation des originaux suite à l'usure du temps, à la manipulation des documents et à la reproduction haute fidélité dont nous disposions (photocopies laser couleurs). Les distances inscrites sur les cartes originales (mesures réelles) et la distance mesurée sur la reproduction (mesures réelles reproduites) ont été les deux variables testées. Un échantillon aléatoire de 30 distances a été choisi. La valeur de la pente de la relation est de 1 et l'ordonnée à l'origine de 0 indiquant une excellente correspondance entre les données.

Hunt (1969, 1971) a utilisé la superficie des mouilles estimée par section afin de montrer les changements dans l'habitat physique. Afin de pouvoir évaluer les changements dans l'habitat depuis 1966, il était important de vérifier que la méthode de calcul utilisée par Hunt (1969, 1971) pouvait se comparer directement avec la méthode que nous utiliserons. Un test sur les calculs de superficie de mouilles a été effectué sur les cartes d'habitat de 1963 et de 1966. Le test consistait à prendre les valeurs obtenues par Hunt (1971) en 1963 et en 1966 et à les comparer avec les superficies obtenues pour les mêmes cartes, mais avec une méthode différente utilisant une méthode automatisée (SIG) (Tableau 2.1). Les cartes numérisées de 1963 et 1966 ont été introduites dans le système d'information géographique MAPINFO et géoréférencées afin de produire des calculs de superficie de mouilles. Nous avons comparé les valeurs des superficies de 14 mouilles estimées par les deux méthodes.

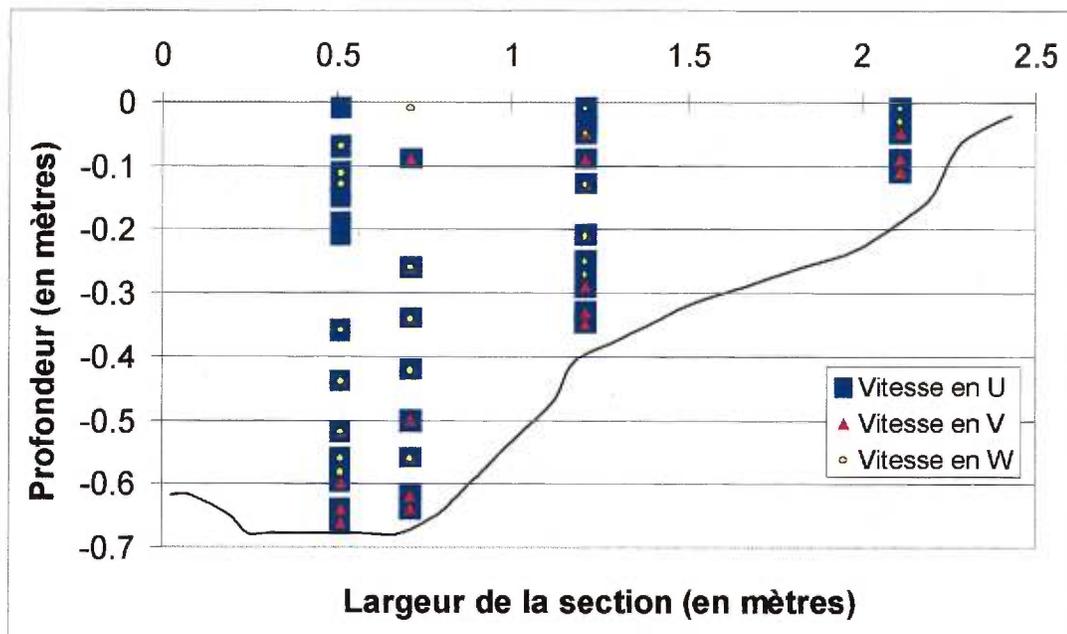


Figure 2.11 Localisation des composantes mesurées le long de la coupe transversale # 1

Pour 1963, aucune différence majeure n'a été notée entre les deux méthodes de calcul. Par contre, pour 1966, les différences sont significatives. La tendance entre les sections est relativement la même mais les valeurs obtenues par le SIG sont nettement plus faibles (Figure 2.12). Ceci laisse croire qu'une erreur de calcul s'est produite en 1966 ou qu'un changement de méthode ou d'opérateur a eu lieu. Ces résultats indiquent que pour la comparaison de l'habitat physique, les valeurs de 1963 et de 1966 devaient être recalculées par le SIG.

1963				1966			
Manuelle		SIG		Manuelle		SIG	
X (moyenne)	S (écart-type)	X (moyenne)	S (écart-type)	X (moyenne)	S (écart-type)	X (moyenne)	S (écart-type)
43,76	31,29	45,55	33,55	165,63	50,48	115,52	28,09
n=14 t= 0,47				n=14 t=8,11*			

* significatif à 0,01

Tableau 2.1 Comparaison statistique des techniques de mesures (test-t)

Les variables dont les superficies ont été calculées par le SIG sont celles qui permettraient une comparaison avec les résultats de Hunt (1969, 1971). Le Tableau 2.2 présente les différentes variables utilisées dans la comparaison des trois cartes.

Variables Utilisées	Méthode de calcul
Aire totale (m)	Calcul de superficie sur les cartes
Largeur moyenne (m)	Trente mesures de largeur sur la carte
Profondeur moyenne (m)	Calcul de la moyenne avec les profondeurs indiquées sur la carte
Nombre de mouilles (dépression dans le lit)	Calcul sur la carte
Nombre de mouilles de plus de 0,60 m	Calcul sur la carte en utilisant les profondeurs indiquées
Longueur du couvert (m) <i>estimation pour 1963</i>	Calcul de la longueur des structures sur la carte
% de couvert	(Longueur du couvert / Aire totale) X 100
Aire des mouilles	Calcul des superficies identifiées sur les cartes
Aire du substrat de sable	Calcul des superficies identifiées sur les cartes
Aire du substrat de gravier	Calcul des superficies identifiées sur les cartes
% de mouille	(Aire des mouilles/aire totale du cours d'eau) X 100
% de l'aire occupée par chaque catégorie de substrat	
Sable	(Aire du substrat de sable / Aire totale du cours d'eau) X 100
Gravier	(Aire du substrat de gravier / Aire totale du cours d'eau) X 100

Tableau 2.2 Variables utilisées pour la comparaison des cartes et méthodes de calcul utilisées.

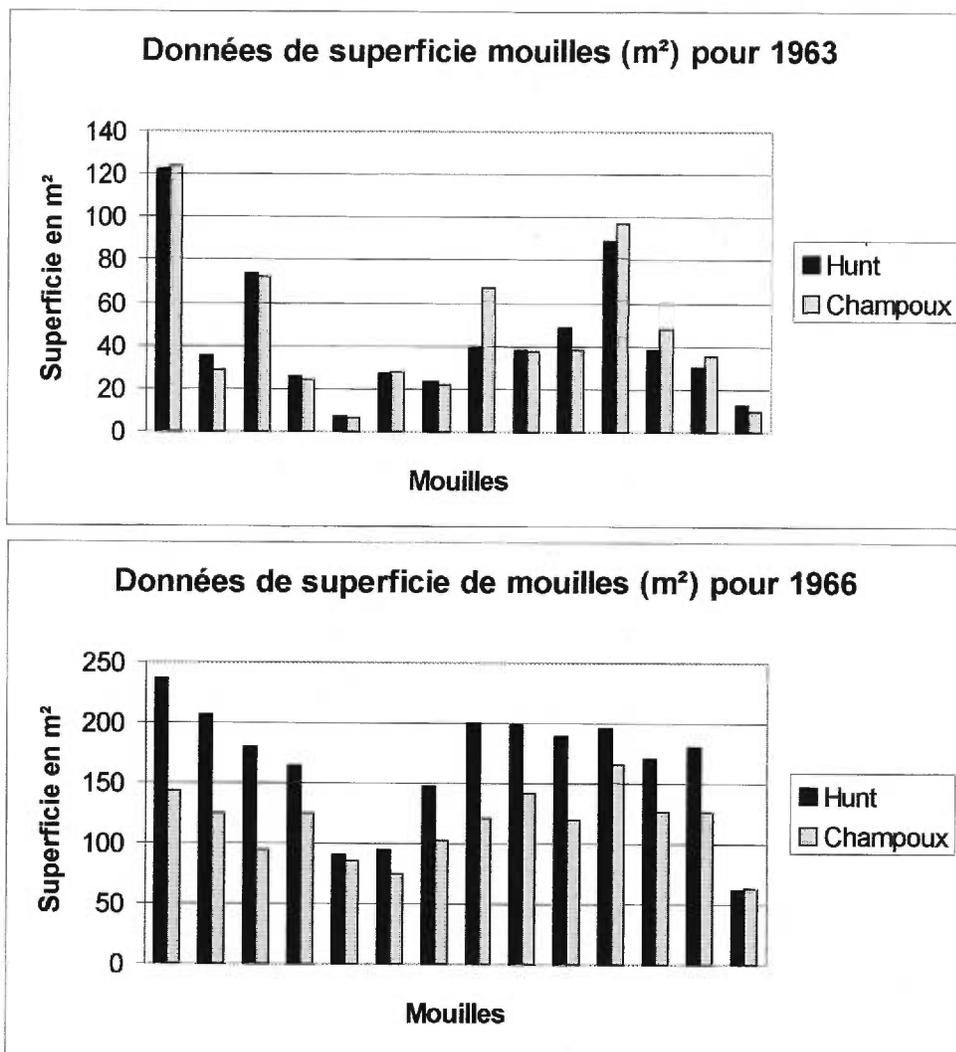


Figure 2.12 Comparaison des superficies de mouilles selon les deux techniques de calcul : Hunt, Champoux

Les cartes d'habitat ont aussi été utilisées dans la reconstruction du profil longitudinal de la Lawrence Creek en 1966 en utilisant les profondeurs inscrites sur les cartes et en sachant leur distance le long de la rivière. Pour estimer la pente du lit de la rivière (*s en %*) de 1966, une formule empirique développée par Simons et Albertson (1963) pour des rivières à lit sablonneux a été utilisée (le débit utilisé est celui de la station de l'USGS de la Lawrence Creek: moyenne de 0,48m³/s de 1967 à 1973) :

$$s = 0.0026Q^{-0.30} \quad (4)$$

En considérant les profondeurs comme les résidus d'une équation polynomiale de deuxième degré (qui permet de représenter la concavité d'une rivière), il est possible de recréer l'équation du profil (à partir des résidus, qui sont les profondeurs) en fixant une ordonnée à l'origine arbitraire (correspondante à une mesure d'élévation réaliste) en utilisant une équation permettant de prédire une valeur d'élévation le long du talweg en fonction de la distance. L'équation théorique se présente sous la forme :

$$y = c_2x^2 + c_1x + s \quad (5)$$

x étant la distance le long du talweg (en m) et *y* la valeur d'élévation (en m). Donc, en remplaçant les distances le long du talweg (*x*) et la pente (en %) de la relation obtenue par la relation de Simons et Albertson (1963) (équation 4) on obtient la valeur de *y* (élévation en m). Le profil obtenu est une estimation du profil réel de 1966. Par contre, l'intensité et la localisation des variations sont dans le même ordre de grandeur que les données réelles puisque les données source, c'est-à-dire les profondeurs, proviennent de la carte de 1966.

2.3.3.2) Analyse des données topographiques

Toutes les analyses utilisant les données topographiques ont été effectuées à l'aide d'un SIG. Milne et Sear (1997) ont montré que l'utilisation des SIG permet de mettre en évidence les changements qui peuvent survenir dans une rivière et permet aussi de dériver de nouvelles variables à références spatiales. Pour cette étude, le relevé

topographique détaillé a permis d'extraire des informations pertinentes pour l'hydraulique de l'ensemble de la section (pente du lit, vitesse, cisaillement au lit).

Le relevé topographique de la Lawrence Creek contenait une quantité importante de mesures d'élévation. Sur la distance du relevé topographique, soit 600 mètres par une largeur moyenne de 5,8m environ 6000 points de mesure ont été pris. Afin de pouvoir comparer le relevé de 1999 aux cartes d'habitat de 1963 et 1966, le relevé de 1999 a été divisé en sections correspondantes aux sections établies par Hunt (1969). Ainsi, six sections d'environ 100 m chacune ont servi à la production des cartes d'habitat. Nous avons utilisé une interpolation par triangulation (TIN) afin de représenter la topographie du lit de la rivière à partir des données prises sur le terrain.

Les cartes d'habitat sont extraites essentiellement des relevés topographiques. Les zones de mouille ont été définies par les dépressions dans le lit tout comme Hunt (1969) l'avait fait. Ensuite, le substrat a été identifié grâce aux codes enregistrés lors du relevé topographique. Ainsi, les zones de sable, de gravier, de silt et les structures ont pu être délimitées. Par la suite, les superficies des zones de chacune des cartes ont été mesurées pour pouvoir être comparées aux superficies de 1963 et de 1966.

Les données topographiques ont aussi servi à construire le profil en long de la rivière. Les élévations du lit le long du profil ont été mesurées à tous les 6 m sur la distance totale de 600 m. La comparaison des profils de 1966 et de 1999 a servi dans l'analyse des processus d'ajustement du cours d'eau. Cette analyse s'est basée sur les différences d'élévation entre 1966 et 1999 ainsi que sur la courbe cumulée de ces différences. Cette courbe des élévations cumulées représente une mesure de la stabilité ou de l'instabilité de la rivière. La courbe cumulée des élévations a été mise en relation avec la distribution spatiale des zones de mouilles ainsi que de leurs caractéristiques. Par exemple, certaines zones de mouilles ont subi une fragmentation depuis 1966. Ceci s'exprime par une hausse des élévations dans les courbes et est détectable par l'analyse visuelle de la distribution spatiale des mouilles aux mêmes distances.

Les données topographiques ont aussi servi à l'élaboration d'indicateurs descriptifs de la dynamique de l'écoulement pour l'ensemble de la section d'étude. Les indicateurs ont été calculés pour les 6000 points de terrain et ont ensuite servi à l'élaboration de cartes. La vitesse moyenne de l'écoulement (v) a d'abord été estimée par l'équation de Manning (1889) :

$$v = \frac{R^{\frac{2}{3}} s^{\frac{1}{2}}}{n} \quad (6)$$

où R le rayon hydraulique, s la pente du lit et n le coefficient de friction de Manning.

La pente (s) du lit a été calculée sur des tranches de 10 m le long de la rivière (en prenant la valeur à 0 m et la valeur à 10 m pour chacune des tranches de 10m). Par conséquent, tous les points d'élévation mesurés entre les tranches de 10 m et dont la profondeur a été estimée à partir des données d'élévation se voyaient attribuer la valeur de la pente calculée à l'intérieur de cette tranche.

Nous avons estimé le coefficient de friction de Manning (n) à partir de la taille des sédiments sur le lit à chacun des points de mesure. Le coefficient a été obtenu en utilisant l'équation développée par Strickler (1923) qui est valide lorsque $Y > 10D_{50}$ et qu'il n'y a pas de résistance due à la végétation ou à la sinuosité du cours d'eau:

$$n = 0.0515 D_{50}^{\frac{1}{6}} \quad (7)$$

où D_{50} représente le diamètre médian des sédiments présents sur le lit (en mm). Pour la Lawrence Creek, le D_{50} des zones de substrat de sable était de 0,5 mm et pour les zones de gravier de 25 mm.

L'utilisation de l'équation de Manning pour estimer la vitesse exige une certaine prudence dans l'analyse des résultats.

Le deuxième indicateur hydraulique estimé sur l'ensemble de la section a été la force de cisaillement au lit (τ_0). Cet indicateur hydraulique permet de connaître la force par unité de surface exercée par l'eau sur le lit de la rivière. Ainsi, il est possible d'identifier, en connaissant le substrat, les endroits où le transport en sédiments est plus important et où la rivière sera plus dynamique. L'équation donnant la contrainte de cisaillement est exprimée par :

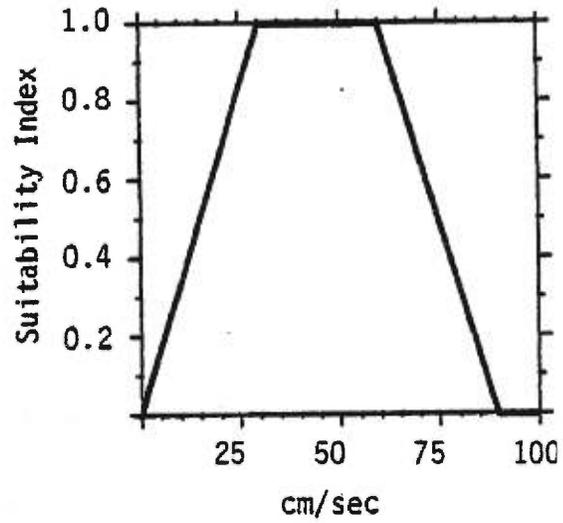
$$\tau_0 = \gamma R_s \quad (8)$$

où γ est le poids spécifique de l'eau. On doit ici aussi être prudent en utilisant cette relation, puisqu'elle assume un écoulement uniforme et tend à surestimer la contrainte agissant sur les particules au lit (Robert, 1990). Par contre, tout comme la vitesse, la contrainte de cisaillement permet de mettre en lumière la variabilité hydraulique à l'échelle de la section d'étude.

Finalement, nous avons estimé un indicateur biologique qui pourra être comparé aux courbes de préférence d'habitat développé par le U.S. Fish and Wildlife Service. Il s'agit de l'indice de préférence de la truite mouchetée (*Salvelinus fontinalis*). Plusieurs variables sont utilisées pour calculer la valeur de l'indice aux points de mesure. Pour la Lawrence Creek, nous avons eu recours à la profondeur et la vitesse à chaque point et aux diagrammes de Raleigh (1982). Il est important de mentionner que les courbes développées par Raleigh (1982) s'appliquent aux rivières du Wisconsin. La première étape a été d'attribuer à chacune des valeurs de terrain la valeur de la courbe de préférence (Figure 2.13). Par exemple, une vitesse sur le terrain de 45 cm/s avait la valeur 1.0 de la courbe de préférence. Il est à noter que la valeur de 1.0 sur la courbe correspond aux préférences maximales et que plus la valeur diminue, moins l'habitat est bon.

A.

Vitesse moyenne (cm/s)



B.

Profondeur moyenne du Talweg (cm)

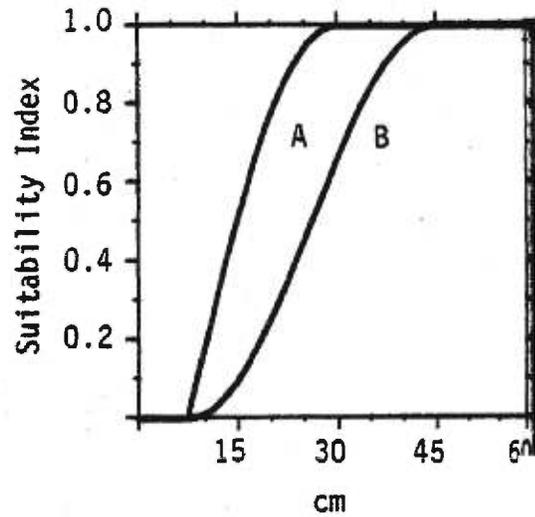
A= largeur \leq 5 mB= largeur $>$ 5 m

Figure 2.13 **A.** Courbe de préférence de la truite mouchetée (*Salvelinus fontinalis*) pour la vitesse de l'écoulement
B. Courbe de préférence de la truite mouchetée (*Salvelinus fontinalis*) pour la profondeur (tirées et adaptées de Raleigh, 1982)

Dans ce calcul de l'indice, nous avons jugé l'importance relative des deux variables comme étant égale. Ainsi l'indice de la vitesse et de la profondeur a pu être calculé en utilisant la formule :

$$Index = (I_v * I_p)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

où I_v représente la valeur de l'indice pour la variable vitesse et I_p pour la variable profondeur. Cette opération a été répétée pour les 6000 points et une carte de distribution des valeurs d'habitats à partir des courbes de préférences pour la truite a été produite

2.3.3.3) Analyse des données hydrauliques

Nous avons analysé les données hydrauliques de la section étudiée en détail pour chacune des six coupes transversales établies sur le terrain. Les mesures de vitesse et des statistiques (vitesse moyenne, écart-type, intensité turbulente) de l'écoulement permettant une analyse quantitative de la turbulence ont été mises en relation avec la topographie locale de la coupe ainsi qu'avec la présence des structures.

Lors du traitement des données, aucune rotation n'a été appliquée aux mesures de vitesses brutes tel que prescrit par Roy *et al.* (1996). Le bon alignement des ECMS entre eux et leurs positions perpendiculaires dans l'écoulement à chaque série de mesure permet de croire que les composantes mesurées de l'écoulement n'ont pas été contaminées par une autre composante qui ne faisait pas l'objet de mesure.

Les variables calculées à partir des données de vitesse ont permis de produire différentes cartes pour chacune des coupes transversales. Les variables utilisées sont :

1° Les moyennes pour les composantes des vitesses longitudinales, verticales et latérales.

$$\langle V_i \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i \quad (10)$$

Où n = Longueur de la série (nombre total de mesures)

$U_i(t)$ = Vitesse instantanée au temps t pour les composantes longitudinale
verticale ou latérale

2° Les écarts-types de la composante longitudinale (u'), verticale (v') et latérale (w') de l'écoulement. Les écarts-types représentent les fluctuations de vitesse autour de la moyenne. Ils sont représentés par :

$$V' = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_i - \langle V \rangle)^2 \right]^{0.5} \quad (11)$$

Où $\langle V \rangle$ = vitesse moyenne pour les composantes longitudinale, verticale ou latérale

3° L'intensité turbulente représente l'ampleur des fluctuations de vitesse par rapport à la moyenne et est donnée par:

$$itu = V' / \langle V \rangle \quad (12)$$

Où V' = Écart-type des vitesses instantanées d'une composante

$\langle V \rangle$ = vitesse moyenne de la composante

En intégrant les différentes variables de l'écoulement dans les cartes, il a été possible de dégager à l'effet des aménagements sur la dynamique de l'écoulement. Les cartes hydrauliques produites présentent la topographie de la coupe transversale et la localisation de la structure.

Chapitre 3

RÉSULTATS

3.1 Approche

Avant d'élaborer plus en détail sur les résultats de l'étude, il est important de présenter le cadre de travail dans lequel les analyses ont été effectuées par rapport à la nature des documents historiques disponibles ainsi que de la nature du terrain. Nous avons réalisé des cartes d'habitat pour six sections de 100 m correspondant à des points de référence sur le terrain. Ces points de référence sont numérotés de 1 à 56; le numéro 1 étant le point le plus en amont. Pour cette étude, les six sections étudiées se situent entre les points de référence 37 et 56. Donc, une carte numérotée "44-41" se situe entre les points de références 44 et 41, 44 étant le point en aval de la section et 41 en amont.

Dans cette section, la rivière se caractérise par deux ensembles géomorphologiquement distincts. La rivière traverse une moraine terminale, qui s'étend du nord au sud au centre du Wisconsin (Figure 2.3). Ceci fait en sorte que le substrat de cette section est plus grossier et hétérométrique. Cette section sera désignée dans cette étude comme "section morainique". Elle s'étend entre les points de référence 37 et 42. À la sortie de la section morainique, la Lawrence Creek s'écoule sur une plaine d'épandage fluvio-glaciaire. Cette section, désignée "section d'épandage", s'étend du point de référence 42 jusqu'au point de référence 56.

La présentation des résultats se divise en six sections. D'abord, nous examinerons visuellement les cartes d'habitat et procéderons ensuite à une analyse des composantes de l'habitat et des effets de la géomorphologie. La troisième section est une description des changements dans la morphologie et la topographie du lit de la rivière. Par la suite, nous analyserons les changements morphologiques par rapport à certains indicateurs hydrauliques. Ensuite, nous procéderons à une estimation des populations de poissons en 1999. Enfin, nous analyserons plus en détail l'hydraulique et la turbulence dans une section du cours d'eau.

3.2 Examen visuel des cartes d'habitat

Les six cartes d'habitat pour les six sections présentent l'évolution dans le temps des changements morphologiques et sédimentologiques. Les cartes de 1963 et 1966 sont les cartes d'origine du WDNR tandis que les cartes de 1999 ont été réalisées avec les données recueillies sur le terrain. Lorsque cela était possible, une photographie, insérée en mortaise, illustre l'état de la rivière pour chacune des sections et pour chacune des années de cartographie. Pour toutes les cartes d'habitat, l'écoulement de l'eau se fait de la gauche vers la droite ou du haut vers le bas selon l'orientation des sections. Aussi, sur les cartes d'habitat, dans les zones de mouilles, le substrat dominant est le sable. Lorsqu'il y a une zone de gravier, celle-ci est indiquée par la couleur verte. D'une manière générale, les changements dans l'habitat sont nombreux entre les trois années de cartographie. La taille des mouilles a diminué depuis 1966, mais elles sont plus nombreuses. Dans quelques sections, la superficie du substrat de gravier a augmenté de manière significative, mais le substrat de sable est toujours dominant. Les sections où les changements sont les plus significatifs sont situées dans la section morainique, où la largeur de la rivière a considérablement augmenté. Le nombre de mouilles dans ces sections a aussi considérablement diminué. Chacune des six sections de 100m a été analysée visuellement et les résultats sont présentés dans les prochains paragraphes. Pour la cartographie de 1963, les six sections ne seront pas détaillées, puisque la situation est semblable partout, c'est-à-dire que la rivière est large, il y a peu de mouilles et peu de substrat de gravier.

3.2.1 Section 56-50

La Figure 3.1 présente les cartes d'habitat pour la section 56-50 se situant à l'aval de la section de 600 m. Dans cette section, les changements entre 1963 et 1966 sont assez importants. Le changement majeur est l'implantation des structures ainsi que l'augmentation de la superficie des mouilles. Les mouilles tendent à suivre le patron d'écoulement créé par les aménagements et elles longent les structures de façon continue. Il y a peu de sections sans mouille. En 1999, la situation change. La majorité

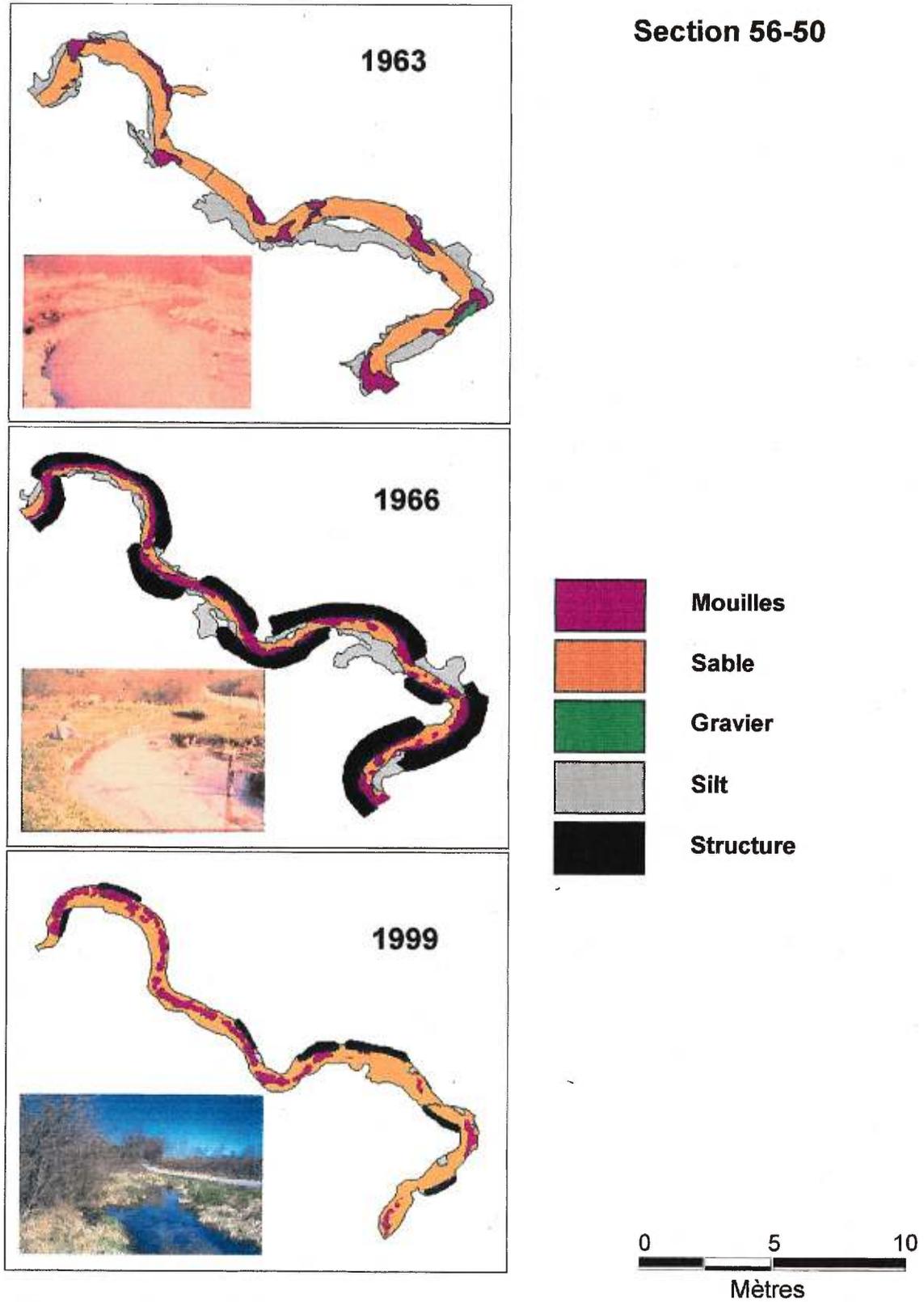


Figure 3.1 Cartes d'habitat section 56-50

des structures dans cette section ne sont plus là ou sont en très mauvais état. La superficie des mouilles a aussi diminué comparativement à 1966 et elles sont devenues isolées les unes par rapport aux autres. Aucun changement majeur dans la composition et la distribution spatiale du substrat ne ressort de la comparaison visuelle des cartes. La superficie du substrat de sable semble être la même entre 1966 et 1999 de même que celle du gravier. La sinuosité de la section est aussi conservée malgré le fait que plusieurs structures, qui contrôlent la sinuosité ne semblent plus être aussi efficaces.

Sur les photographies, les changements que l'on peut observer se situent essentiellement au niveau de l'aspect général d'une partie de la section, c'est-à-dire la forme des berges et de la végétation sur les berges (augmentation de l'irrégularité des berges et incursion de la végétation en surface de l'eau). Les trois photographies ont été prises au même endroit. On peut observer une dégradation des berges de la rivière où se trouvent les structures.

3.2.2 Section 50-47

La Figure 3.2 présente les cartes d'habitat pour la section 50-47 (se situant en amont de la section 56-50). Dans cette section, les changements entre 1966 et 1999 sont moins frappants que dans la section précédente. Les structures sont encore en place et la superficie des mouilles semble être la même. Par contre, il existe une différence dans la distribution spatiale de certaines zones de mouilles. Entre 1966 et 1999, les mouilles de la partie amont de la section se sont fusionnées pour n'en former qu'une seule. Aussi, il y a eu une séparation des mouilles vers le centre de la section. À cet endroit, on peut noter que la largeur de la rivière a légèrement augmenté.

La superficie couverte de sable semble avoir légèrement augmenté. L'accroissement de la largeur dans le centre de la section est peut-être une des causes de cette augmentation. Étant donné que le substrat principal disponible à proximité de la rivière est le sable, une augmentation de la largeur de la rivière par un processus d'érosion par exemple, verra ce nouvel espace comblé par le matériel le plus abondant, ici, le sable. Pour le gravier, aucune différence majeure ne peut être notée.

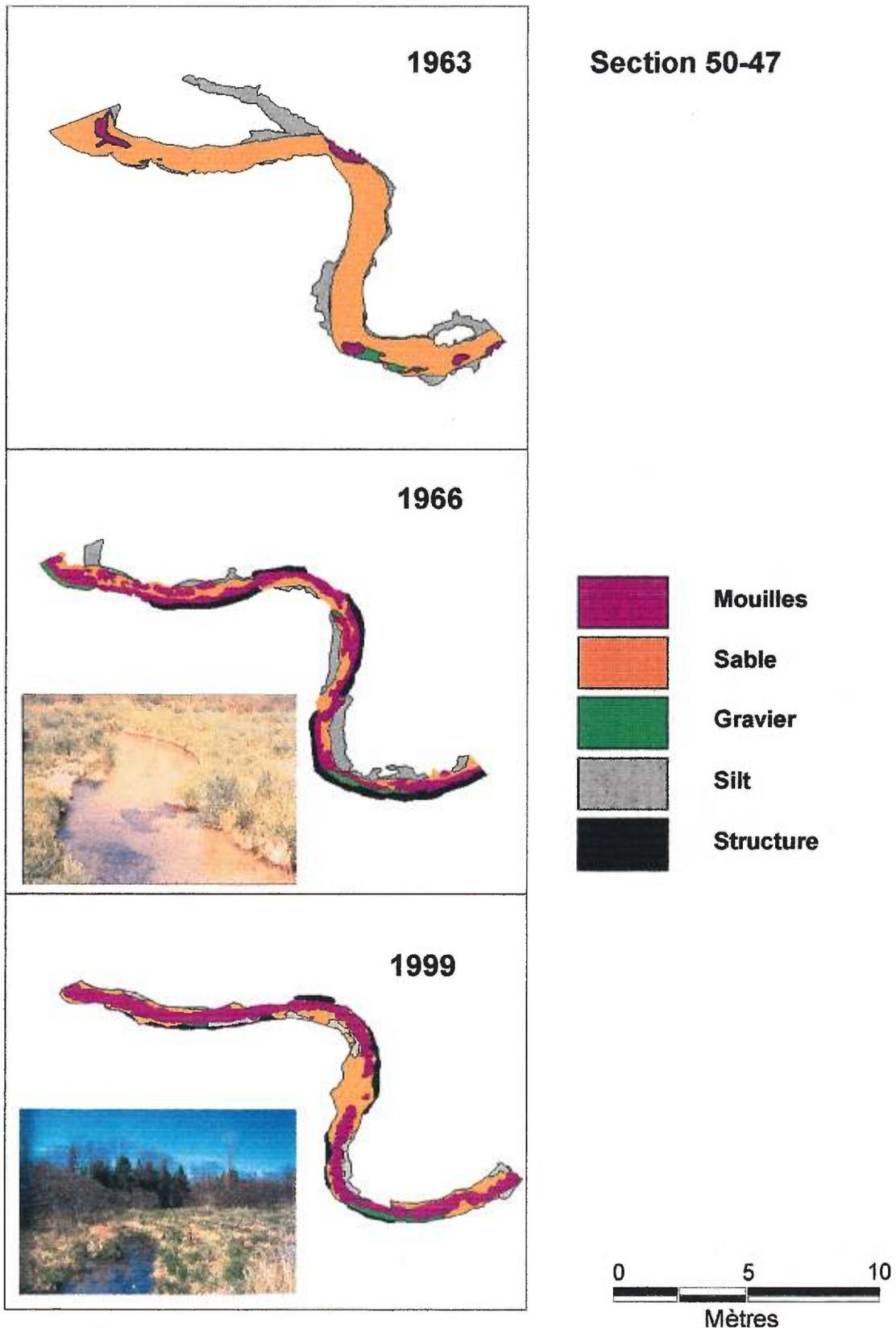


Figure 3.2 Cartes d'habitat section 50-47

Le gravier se retrouve principalement le long des structures, là où les vitesses de l'écoulement sont plus élevées et permettent une mise en transport des sédiments les plus fins. La sinuosité de la rivière n'a pas changé entre 1966 et 1999.

Encore une fois, les photographies nous indiquent des changements sur les berges de la rivière. La végétation présente sur le dessus des structures tend à tomber vers la surface de l'eau ce qui pourrait être un indicateur de la condition physique des structures.

3.2.3 Section 47-44

Les changements dans la section 47-44 (Figure 3.3) sont nombreux compte tenu de la bonne condition actuelle des structures. Dans cette section, le changement ne se produit pas dans la superficie des mouilles, mais dans leur distribution spatiale. Outre la mouille de la partie la plus en amont de la section qui a presque diminué de moitié, les autres mouilles se sont déplacées vers l'amont. La mouille qui était en 1966 au centre de la section se retrouve en 1999 encore plus en amont et a englobé les plus petites mouilles de 1966 en forme de croissant (au centre de la section en 1966), associées à la présence d'un bloc sur le lit. Une situation similaire s'est produite dans la partie la plus en aval de la section. En 1966, il y avait une rupture entre les deux mouilles qui a disparu, la mouille est beaucoup plus large et la mouille de 1966 (celle située en amont de l'autre) n'est plus là.

On peut aussi remarquer que la largeur de la rivière a diminué depuis 1966. Ceci pourrait en partie expliquer les changements dans la distribution spatiale des mouilles. Comme la largeur est moins grande et que le débit qui y passe est le même, la vitesse de l'écoulement à travers la section augmente, ce qui entraîne une augmentation de la contrainte de cisaillement au lit et un ajustement de la morphologie.

Pour le substrat, nous n'observons aucun véritable changement dans les superficies du lit occupée par le sable et le gravier sinon qu'il y a peut-être une légère diminution de la superficie de sable à cause du rétrécissement de la rivière.

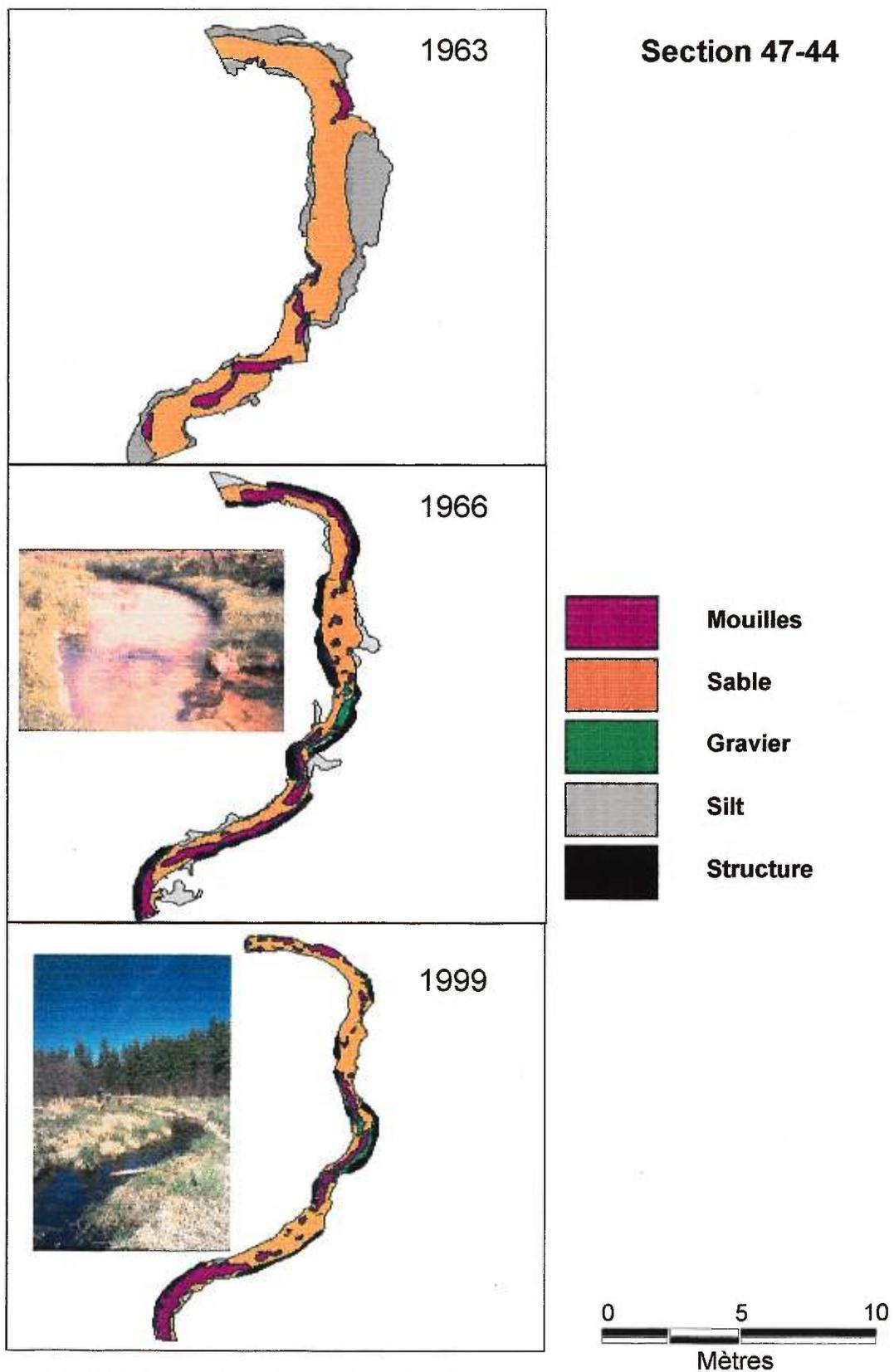


Figure 3.3 Cartes d'habitat section 47-44

On note que la grande partie du sable dans cette section se retrouve au même endroit pour 1966 et 1999.

Au centre de la section, le gravier est très présent ce qui serait lié à des vitesses de l'écoulement relativement plus élevées là qu'ailleurs dans la section. Ceci tend à confirmer l'hypothèse que le rétrécissement de la rivière entraîne une augmentation de la vitesse moyenne de l'écoulement. Les zones où on retrouve le gravier au centre de la section en 1966, se distribuent plus en amont en 1999. C'est aussi à cet endroit qu'une nouvelle mouille s'est formée depuis 1966, encore une fois à cause des vitesses moyennes probablement plus élevées.

Sur les photographies, les changements les plus marquants sont sur les berges, qui sont devenues plus irrégulières. Dans cette section, comme dans les autres, on note la forte présence de la végétation sur les structures qui permet une stabilité de la structure.

3.2.4 Section 44-41

La section 44-41 (Figure 3.4) se situe dans la zone de transition entre les sections faisant partie de la zone "d'épandage" et de celles de la zone "moraine". Le changement majeur se retrouve dans les mouilles qui sont plus grandes depuis 1966. Par contre, on peut aussi observer que la largeur moyenne de la section a beaucoup diminué, ce qui a peut-être favorisé l'augmentation de la superficie des mouilles dans cette section. De plus, on remarque que les mouilles se sont amalgamées en une seule grande mouille. Malgré le fait que la largeur de la rivière ait diminué, la sinuosité de la section semble être la même depuis 1966. Enfin, on peut remarquer que la partie amont de la section a complètement changé. Les mouilles sont devenues beaucoup plus petites et la largeur de la rivière a diminué de près de 50%. Les îlots (berges) qui étaient présents en 1966 ont été remplacés par le gravier.

Le substrat a surtout changé dans la zone en amont de la section, qui correspond à la fin de la section morainique. Ainsi, on peut remarquer une augmentation marquée depuis 1966 de la superficie couverte par le gravier.

Section 44-41

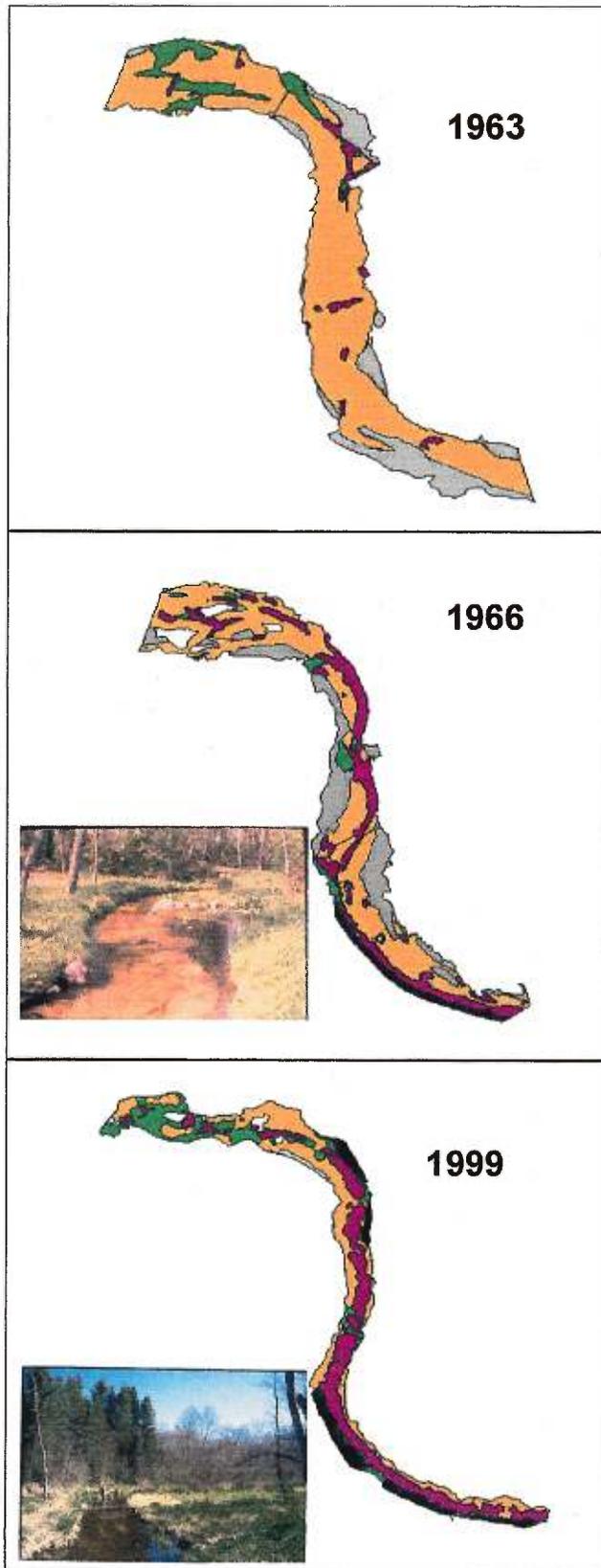


Figure 3.4 Cartes d'habitat section 44-41

Ceci est probablement la conséquence de la mise en transport de gravier provenant de la moraine située en amont et qui se dépose dans cette section. La superficie couverte par le sable semble être la même en 1999 qu'en 1966.

Les photographies et les cartes d'habitat confirment que cette section est très dynamique. Le fait qu'elle soit dans une zone de transition entre la section morainique et la section d'épandage est sûrement une des causes des changements observés. Sur les photographies, on constate que la largeur de la rivière a diminué entre 1966 et 1999. Aussi, l'irrégularité des berges n'est pas aussi marquée que dans les autres sections. En effet, les structures installées dans cette section sont encore en bon état, ce qui semble contredire les indicateurs nombreux de changements dynamiques.

3.2.5 Section 41-39

La Figure 3.5 présente les cartes d'habitat de la section 41-39 située dans la section morainique. En observant les cartes, on peut tout de suite remarquer que les changements sont majeurs. Entre 1966 et 1999, rien n'est vraiment demeuré stable. Les mouilles sont devenues plus petites, la largeur de la rivière ainsi que sa sinuosité ont complètement changé (augmentation de la largeur), la seule structure qui était installée dans cette section est complètement détruite et la superficie occupée par du gravier a augmentée. La distribution spatiale du gravier dans la section a changé. En 1966, le gravier se concentrait surtout sur la berge droite (en regardant vers l'aval). Par contre en 1999, le gravier est maintenant beaucoup plus au centre. Ceci pourrait être un indicateur de changement dans l'écoulement. En effet, les zones où le gravier est présent est un indicateur d'une vitesse d'écoulement plus élevée. Ceci pourrait vouloir dire que le talweg de la rivière s'est déplacé de la berge droite vers le centre. Une des raisons de ce changement pourrait être que la sinuosité de la rivière a changé en amont de la section. Ainsi, l'eau qui s'écoule n'a plus tendance à aller vers la berge, mais plutôt vers le centre de la section.

Il est évident que cette section est très dynamique. En regardant les photographies, on remarque tout de suite des différences majeures entre 1966 et 1999. Durant cette période, on passe d'un chenal unique à plusieurs chenaux. Aussi, sur la photographie

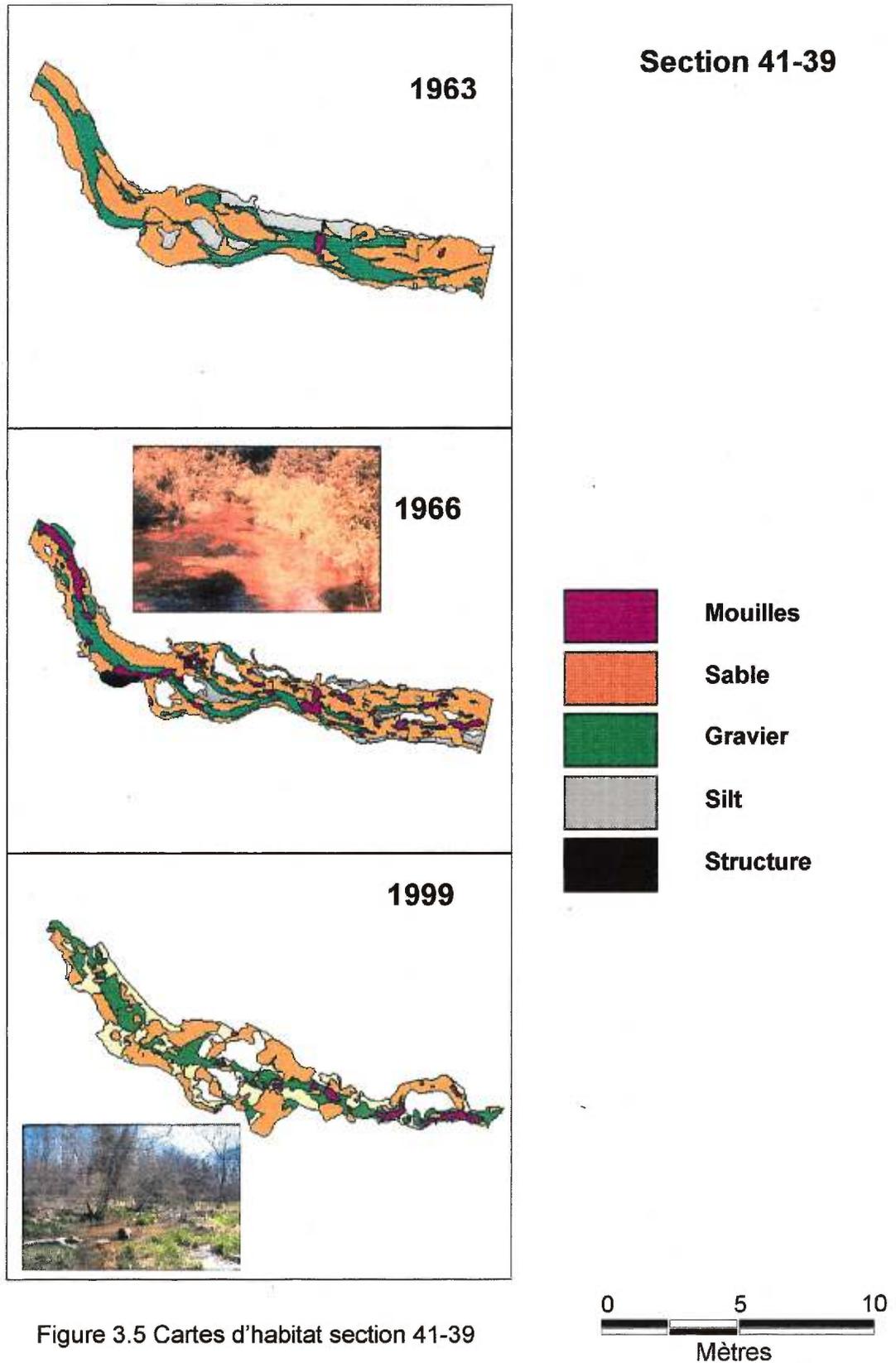


Figure 3.5 Cartes d'habitat section 41-39

de 1999, on constate la présence de gros débris organiques dans la rivière, ce qui peut indiquer une instabilité des berges qui seraient soumises à de fortes contraintes de cisaillement (Newbury et Gaboury, 1993).

3.2.6 Section 39-37

La Figure 3.6 présente la dernière section comprise entre les points de référence 39 et 37 et entièrement située dans la section morainique. Encore une fois, les changements dans cette section sont majeurs. Le changement le plus marqué est la largeur de la rivière qui a considérablement augmenté. Aussi, les mouilles ont presque disparu de la section et de nombreux îlots se sont formés depuis 1966. Par contre, la superficie occupée par le gravier a augmenté sensiblement depuis 1966. Les structures placées dans la partie aval de la section ont complètement été détruites et elles sont maintenant contournées par la rivière. Encore une fois, les changements mettent en lumière la dynamique particulièrement active du cours d'eau de la section morainique.

Sur les photographies, on peut remarquer que la section cartographiée en 1999 ne ressemble pas à ce qu'elle était en 1966. De nombreuses zones d'érosion et d'accumulation peuvent être notées. Les changements dans cette section sont d'autant plus intéressants que c'est une section où trois structures ont été installées. Par ailleurs, dans la section 41-39, une seule structure a été aménagée et les changements ont aussi été importants. C'est donc dire que les aménagements dans la section morainique n'ont eu que peu de contrôle sur la dynamique de la rivière.

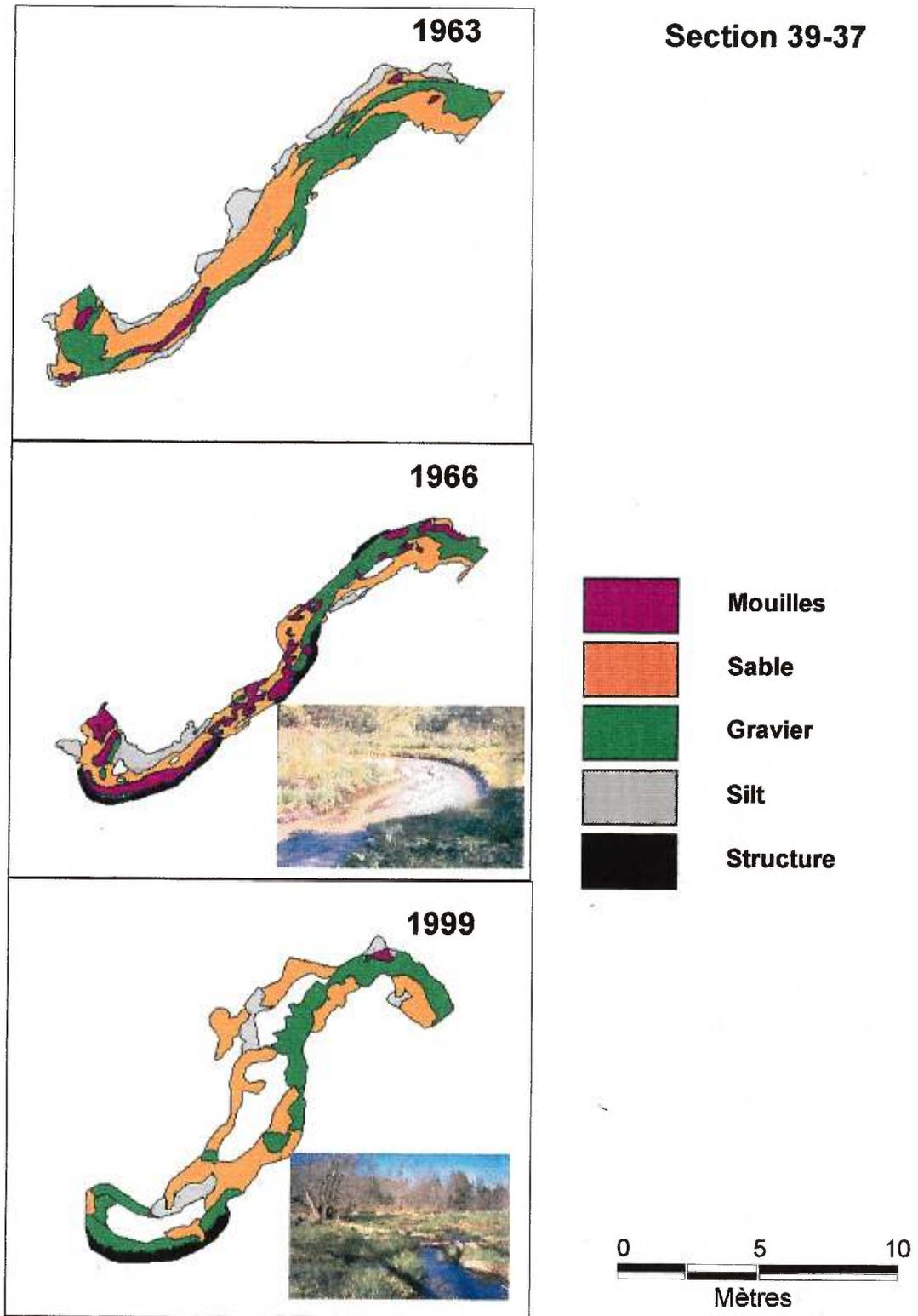


Figure 3.6 Cartes d'habitat section 39-37

3.3 Valeurs des différentes composantes de l'habitat physique

Après avoir décrit les changements entre les cartes d'habitat de façon qualitative, nous avons réalisé une analyse plus quantitative et détaillée des composantes de l'habitat physique pour l'ensemble des sections. Il est important de mentionner que toutes les valeurs qui seront présentées ont été estimées à partir des cartes d'habitat de la section 3.2 et ne sont pas basées sur les données de Hunt (1969). Le Tableau 3.1 présente les valeurs obtenues pour différentes composantes de l'habitat physique pour les trois années de cartographie.

Composantes de l'habitat physique	1963	1966	1999
Aire totale (m ²)	3175,0	2416,9	2551,7
Largeur moyenne (m)	5,8	4,2	4,8
Profondeur moyenne (m)	0,12	0,21	0,17
Nombre de mouilles	55,0	123,0	103,0
Nombre de mouilles de plus de 0,60 m	9	25	19
Longueur du couvert (m) <i>estimation pour 1963</i>	110	420	228
Aire des mouilles (m ²)	266,7	624,9	488,3
Aire du lit couvert de sable (m ²)	2682,5	1678,1	1607,8
Aire du lit couvert de gravier (m ²)	425,2	363,5	478,7
% de la superficie de mouille (aire des mouilles /aire totale)	8,4	25,9	19,1
% de l'aire occupée par du sable	84,5	69,4	63,0
% de l'aire occupée par du gravier	13,4	15,0	18,8

Tableau 3.1 Composantes de l'habitat physique selon les trois années de cartographie

Le Tableau 3.1 indique que des changements se sont produits depuis 1963. Pour l'analyse, 1963 sera considéré comme l'état le plus limitant pour l'habitat physique, presque toutes les composantes étaient limitantes pour les populations de poissons, particulièrement le couvert et l'aire des mouilles. Ainsi, les changements peuvent être comparés à cet état moins favorable pour le développement des salmonidés.

Depuis 1966, la profondeur moyenne de la Lawrence Creek a diminué de 18%. Ce changement n'est peut être pas considérable, mais en comparant à 1963 où la profondeur moyenne était de 0,12m, ce résultat prend une autre signification et indique une tendance à retourner vers l'état de 1963 et que la diminution de la

profondeur est directement liée à la baisse dans le nombre de grandes mouilles profondes. En 1966 il était de 25 et en 1999 il n'est plus que de 19. Ces changements, indiquent un retour progressif vers les conditions de 1963.

Un résultat significatif concerne la longueur du couvert. Le couvert est essentiellement fourni par les structures qui permettent aux poissons de s'abriter. En 1966, alors que les structures étaient nouvellement installées, le couvert disponible était de 420 m. En 1999, il n'est plus que de 228 m, soit une diminution de près de 45%. Ce changement est majeur si on considère qu'en 1963, alors que le couvert était un des facteurs limitants (Hunt, 1971), la longueur disponible n'était que de 110 m. La diminution du couvert est surtout liée à la détérioration physique des structures en 1999. Par contre, la condition actuelle des structures est un indice qui permet de mettre en lumière certains processus d'ajustement des cours d'eau.

La diminution de l'aire couverte par des mouilles est aussi notable. Cette composante de l'habitat physique que Hunt (1971) a identifié comme étant limitant à la survie et au développement des salmonidés dans la Lawrence Creek est passée de 624,9 m² en 1966 à 488,3 m² en 1999, une diminution de 22%. En 1963 la superficie des mouilles était de 266,7 m². La superficie des mouilles est influencée par l'aire de la section et par sa largeur. Le pourcentage de la superficie occupée par des mouilles permet de pondérer l'effet de la réduction ou de l'augmentation de l'aire dans les superficies des mouilles. Il a fortement diminué de 1966 (25,9%) à 1999 (19,1%).

La superficie du lit recouvert de gravier est passée de 363,5 m² en 1966 à 478,7 m² en 1999, une augmentation de 32%. Cette augmentation de la superficie du gravier et la réponse à la hausse des populations de salmonidés dans des rivières aménagées ont été observées par House et Boehne (1985, 1986). Pour le sable, aucun véritable changement n'est observé malgré le fait que l'aire totale de la rivière ait augmenté et que les sédiments les plus disponibles à proximité soient des sables. Ceci tend à confirmer le rôle important de l'apport de gravier en provenance de la moraine dans la zone d'épandage située en aval.

La Figure 3.7 présente les pourcentages de changement pour l'ensemble de la section étudiée. Les pourcentages de changement entre les années (1963-1999; 1966-1999; 1963-1966) permettent d'évaluer la magnitude des changements. Les pourcentages de changement entre 1963 et 1999 sont les plus importants, puisqu'ils indiquent l'état de la rivière (en 1999) par rapport à un état où presque toutes les composantes de l'habitat physique étaient limitantes (Hunt, 1969; 1971). Par ailleurs, les pourcentages de changement entre 1966 et 1999 sont aussi très importants parce qu'ils indiquent les changements qui se sont produits depuis que la rivière était dans un état "maximal" pour la survie et le développement des salmonidés. Il est donc plus facile de comparer directement les valeurs entre les trois années de cartographie. Toutes les valeurs des pourcentages de changements se retrouvent en annexe A.

Un des changements les plus frappants entre 1966 et 1999 se retrouve pour la longueur du couvert. Entre 1966 et 1999, la longueur du couvert a diminué de 46%. Ce faisant, on remarque que l'état de la rivière en 1999, se rapproche de l'état de 1963. Un autre changement important est la diminution de 24% des mouilles de plus de 0,60m de profondeur depuis 1966. Par contre, comparativement à l'état de 1963, le changement n'est pas dramatique. Par contre, pour le pourcentage de la superficie du lit occupée par les mouilles, un des facteurs les plus importants, il y a une diminution de 26%. Ce changement est notable considérant l'état de 1963 et le but de l'aménagement de la rivière qui était justement d'augmenter le pourcentage de mouilles. Enfin, le dernier résultat frappant est l'augmentation de 32% de la superficie du gravier depuis 1966.

Généralement, l'état de la rivière en 1999 est encore très bon comparativement à l'état que l'on observait en 1963. Par contre, pour presque toutes les composantes de l'habitat physique, il y eu une dégradation depuis 1966. Ceci laisse croire que les structures installées en 1966 ont joué un rôle clef dans l'amélioration du milieu fluvial pour les salmonidés mais que leur efficacité n'est plus optimale pour assurer le maintien de la qualité de l'habitat.

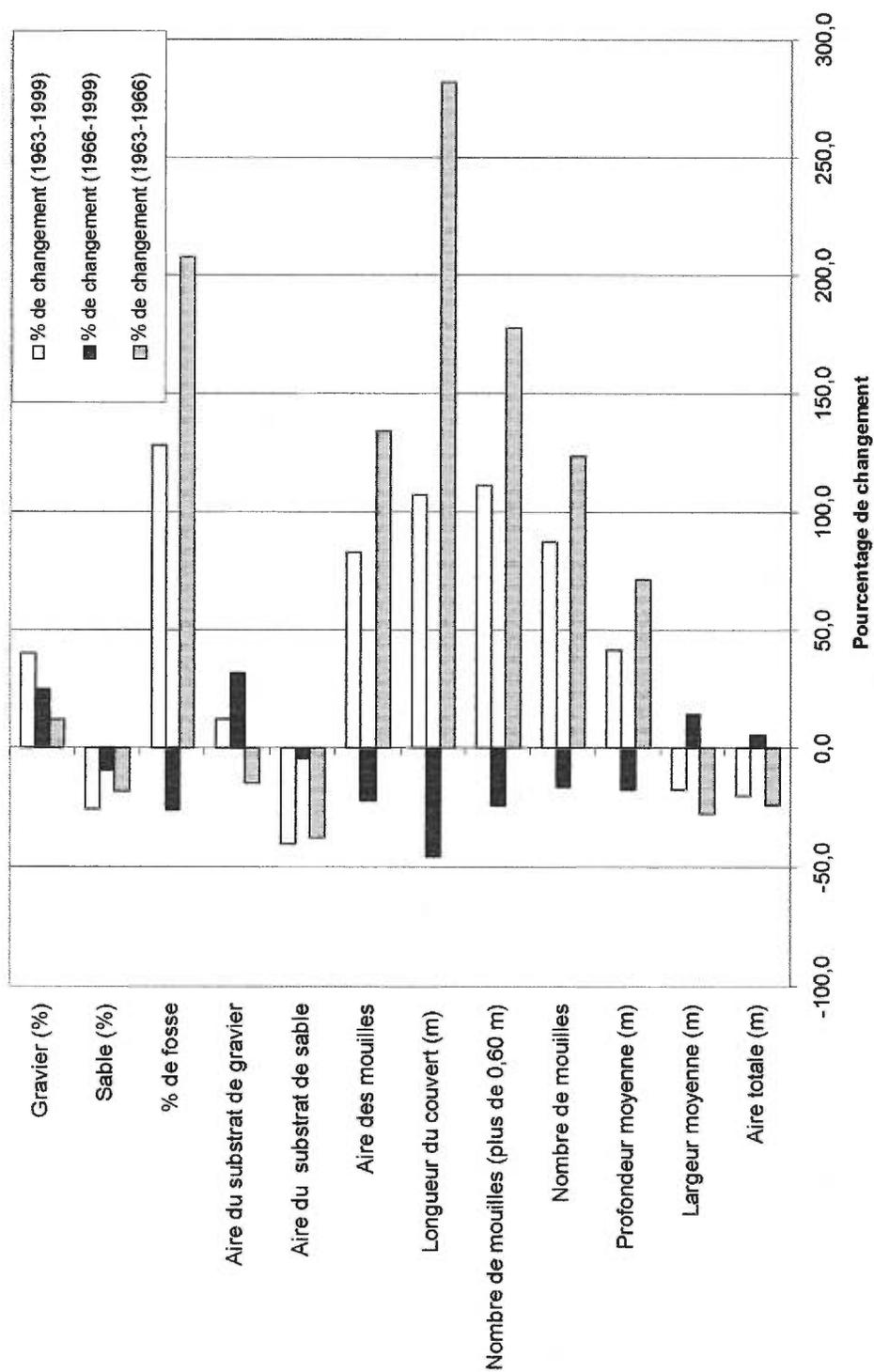


Figure 3.7 Pourcentage de changement pour la section de 600m

3.3.1 Effets du Contexte géomorphologique sur les changements dans l'habitat

L'étude des changements pour l'ensemble de la section masque cependant l'effet du milieu morphologique. En effet, les sections situées dans la zone morainique montrent des changements plus importants depuis 1966 que celles dans la zone d'épandage. Nous avons réexaminé les changements dans les composantes de l'habitat physique selon les deux sections géomorphologiques (moraine et épandage), prises séparément.

La Figure 3.8 présente les pourcentages de changement pour la section morainique. Les résultats les plus frappants pour la section morainique concernent surtout les mouilles, leur nombre et leur extension spatiale. Ainsi, l'aire des mouilles a diminué de 75% depuis 1966. Ce changement est considérable et il se traduit par une diminution de 80% du nombre de mouilles. Ceci indique que dans la section morainique, les mouilles sont devenues moins nombreuses et beaucoup plus petites qu'en 1966. L'état actuel de ces composantes du milieu fluvial constitue un retour vers l'état de 1963. Paradoxalement, les changements dans le substrat sont subtils voire même absents. Il y a eu depuis 1966 une légère augmentation de 11,2% de l'aire occupée par le gravier contre une diminution de 17,5% pour l'aire du substrat de sable. Ce résultat est surprenant compte tenu de l'augmentation assez prononcée de la superficie de gravier pour l'ensemble de la section de 600m. Ceci pourrait traduire une dynamique du transport de sédiments grossiers de la zone morainique vers l'aval.

Les changements entre 1966 et 1999 sont plus nombreux qu'entre 1963 et 1966 où seules les mouilles montrent des changements marqués. En effet, à cette époque, le pourcentage de mouilles a augmenté de près de 800% tandis que les autres composantes sont demeurées relativement stables.

La Figure 3.9 présente les pourcentages de changement pour la section d'épandage, en aval de la section morainique.

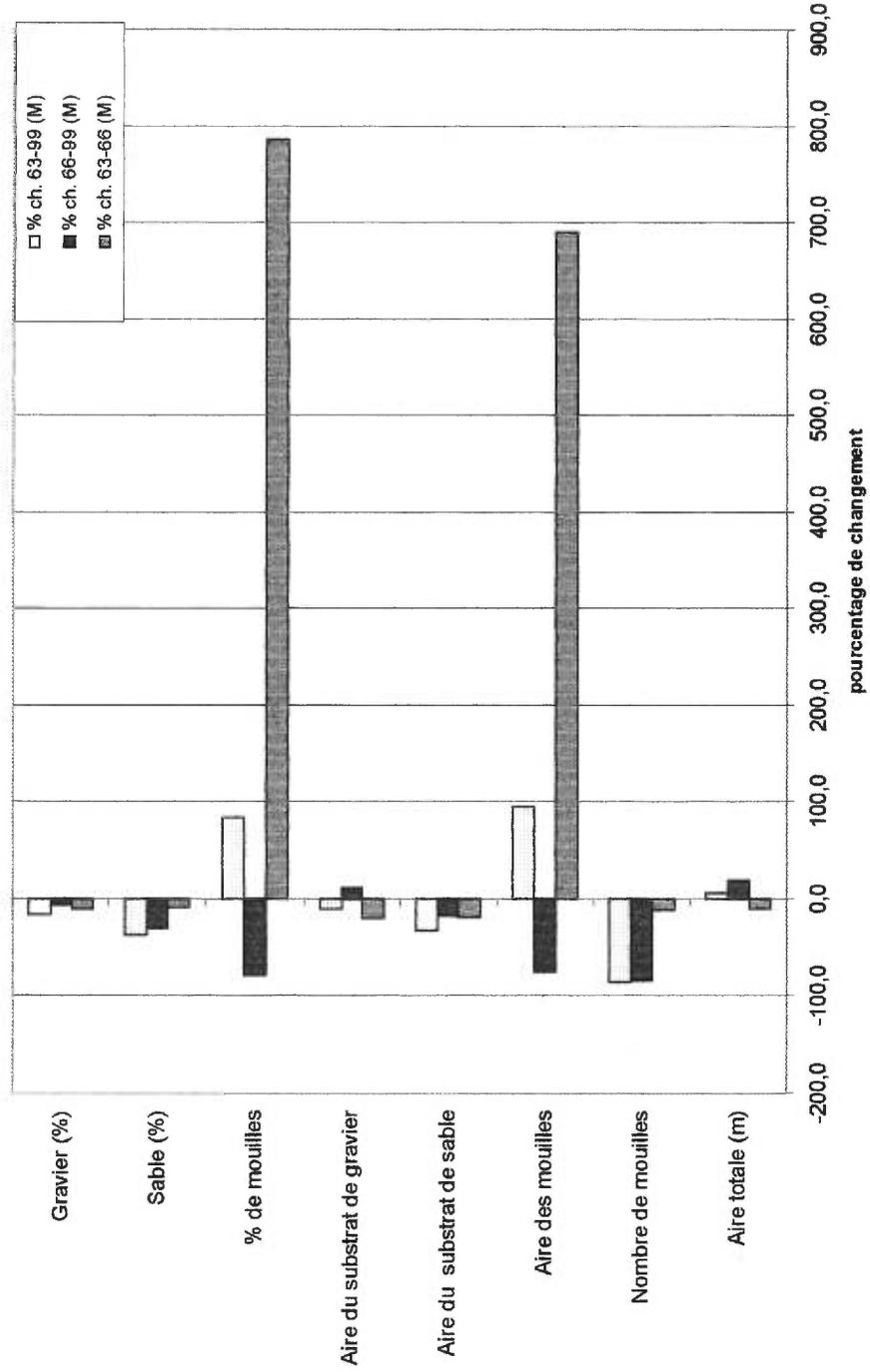


Figure 3.8 Pourcentage de changement pour la section morainique

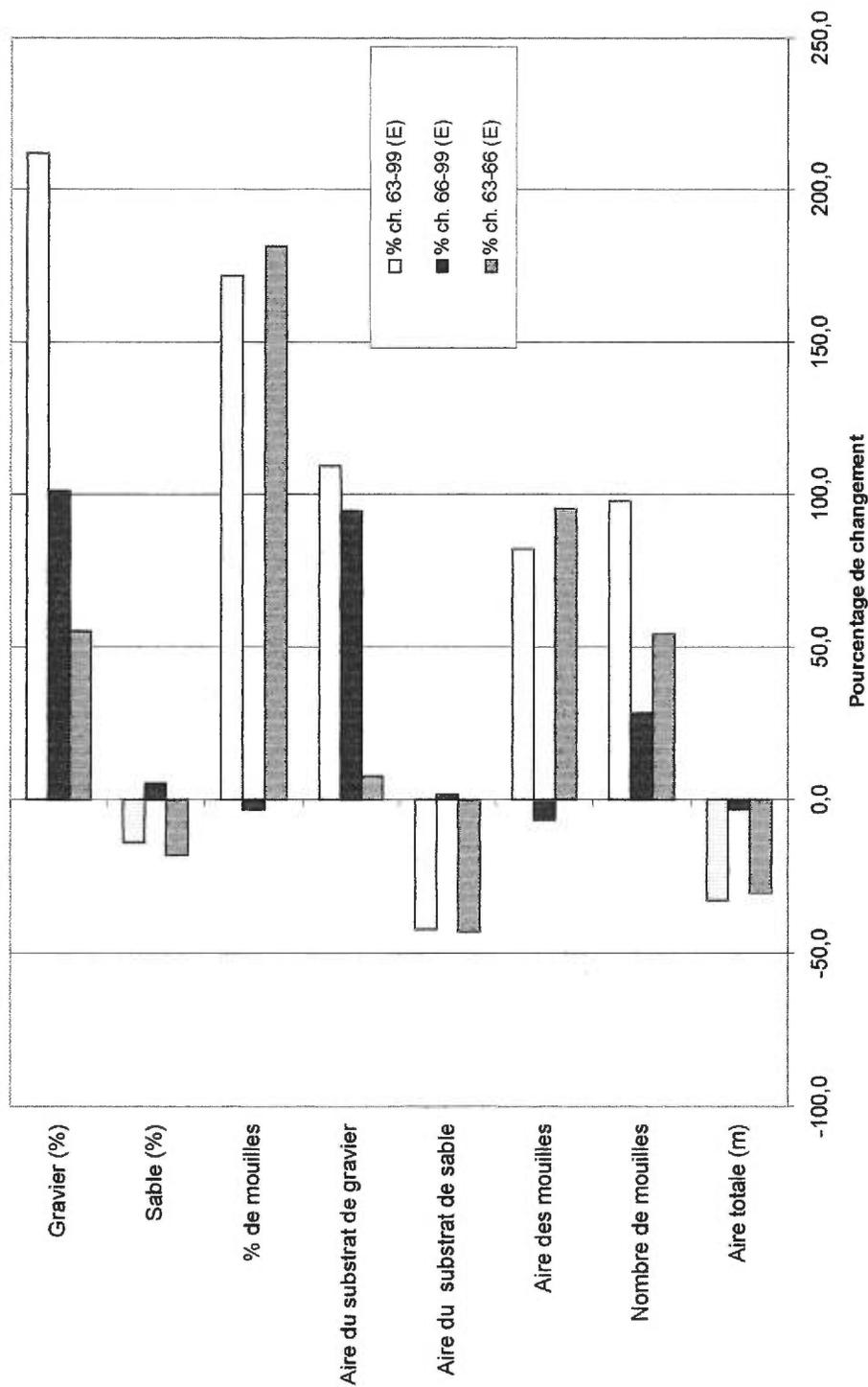


Figure 3.9 Pourcentage de changement pour la section d'épandage

On remarque que l'aire occupée par le substrat de gravier a augmenté de 94,4% depuis 1966. Ainsi, la superficie du substrat de gravier qui n'a presque pas évolué dans la section morainique a subi une augmentation marquée dans la section d'épandage. Ceci suggère une mise en transport des particules grossières dans la section morainique qui se déposent dans la section d'épandage. Aussi, il est important de noter que cette augmentation dépasse largement le pourcentage de changement entre 1963 et 1966. Par contre, la superficie du substrat de sable est demeurée inchangée depuis 1966. L'autre changement concerne les mouilles. Malgré le fait que l'aire des mouilles n'a que légèrement diminué entre 1966 et 1999, leur nombre a augmenté de 28,4%.

3.3.2 Synthèse des résultats

Les résultats des différentes composantes de l'habitat physique font ressortir le fait que les structures semblent mieux adaptées à la section d'épandage. Nous avons effectué une analyse qualitative qui permet de mieux comparer la qualité de l'habitat physique et de synthétiser les résultats. Trois composantes ont été retenues, soit: le pourcentage de gravier, le pourcentage de sable et le pourcentage de la superficie du lit occupée par des mouilles. Une valeur a été attribuée pour chacune des paires d'année de comparaison. Si le changement était "bénéfique" pour l'habitat physique, (par exemple, l'augmentation de la superficie occupée par le gravier ou par les mouilles) le symbole "+" était attribué et si le changement était "nuisible" (par exemple, la diminution de la superficie occupée par les mouilles, ou l'augmentation de la superficie du lit recouverte par le sable) le symbole "-" était attribué, le nombre de symboles représentant l'intensité du changement.

Un signe (d'un sens ou de l'autre) correspond à une valeur de changement d'environ 30%. Le Tableau 3.2 présente les résultats de l'analyse qualitative des trois composantes retenues.

Section de 600 m			
Composante	1963-1966	1966-1999	1963-1999
% de gravier	+	+	++
% de sable	+	+	+
% de mouille	+++++	-	++++

Section morainique			
Composante	1963-1966	1966-1999	1963-1999
% de gravier	-	-	-
% de sable	+	+	+
% de mouille	++++ (26)	---	---

Section épandage			
Composante	1963-1966	1966-1999	1963-1999
% de gravier	++	+++	+++++
% de sable	+	-	+
% de mouille	+++++	+++++	+++++

Tableau 3.2 Analyse qualitative de l'habitat physique selon trois composantes

L'analyse qualitative révèle que l'habitat dans la Lawrence Creek est encore favorable au développement et au maintien des populations de salmonidés. Cette conclusion se base sur les données fournies par Hunt (1969, 1971) sur l'habitat physique et sa relation avec les populations de poissons. Pour l'ensemble de la section (600 m), les conditions en 1999 par rapport à 1963 sont encore très bonnes pour les trois composantes choisies. Par contre, l'habitat a régressé depuis l'état "maximal" de 1966. Pour la section morainique, l'habitat s'est dégradé de façon marquée et les composantes de l'habitat ne sont plus favorables aux salmonidés. Les nombreux changements dans la superficie occupée par les mouilles et par l'augmentation de la couverture du sable sont en partie responsable de la dégradation de l'habitat dans cette section. La section d'épandage quant à elle est encore très bonne pour les

salmonidés malgré une légère diminution du pourcentage de la superficie du lit occupée par des mouilles. L'augmentation marquée du pourcentage de gravier est aussi un élément qui permet de prétendre que l'habitat est encore bon.

Les différences marquées dans les résultats entre les deux sections géomorphologiques indiquent que les structures installées sont mieux adaptées à la morphologie, à la sédimentologie et à la dynamique de l'écoulement de la section d'épandage.

3.4 Morphologie et topographie

Les données prises sur le terrain en 1999 ont permis de dresser une carte très précise de la topographie de la Lawrence Creek. La Figure 3.10 présente la topographie de la section de 600 m. On peut y observer la distribution spatiale des mouilles. En effet, les mouilles, correspondant aux zones bleu foncé, se retrouvent essentiellement dans la section d'épandage. La sinuosité de la rivière est beaucoup plus grande dans cette section comparativement à la section morainique. Enfin, les différences morphologiques entre les sections morainique et d'épandage sont aussi très visibles. Dans la section morainique, la rivière est plus large et moins profonde que dans la section d'épandage. On décèle aussi la présence d'îlots dans la section morainique là où nous avons noté précédemment la détérioration des structures.

La Figure 3.11 présente les profils longitudinaux obtenus à partir des cartes d'habitat (pour 1966) et du relevé topographique (pour 1999). Le datum d'élévation pour les deux profils est arbitraire et indépendant l'un de l'autre.

En 1966, on remarque une différence marquée dans la structure du profil entre la section morainique et la zone d'épandage. En effet, l'amplitude et la fréquence des fluctuations des élévations du lit sont moins importantes dans la section morainique que dans la section d'épandage. Les mouilles, correspondant aux zones de creux dans le profil, sont moins profondes dans la section morainique tandis que dans la section d'épandage, elles sont beaucoup plus importantes et rapprochées les unes des autres.

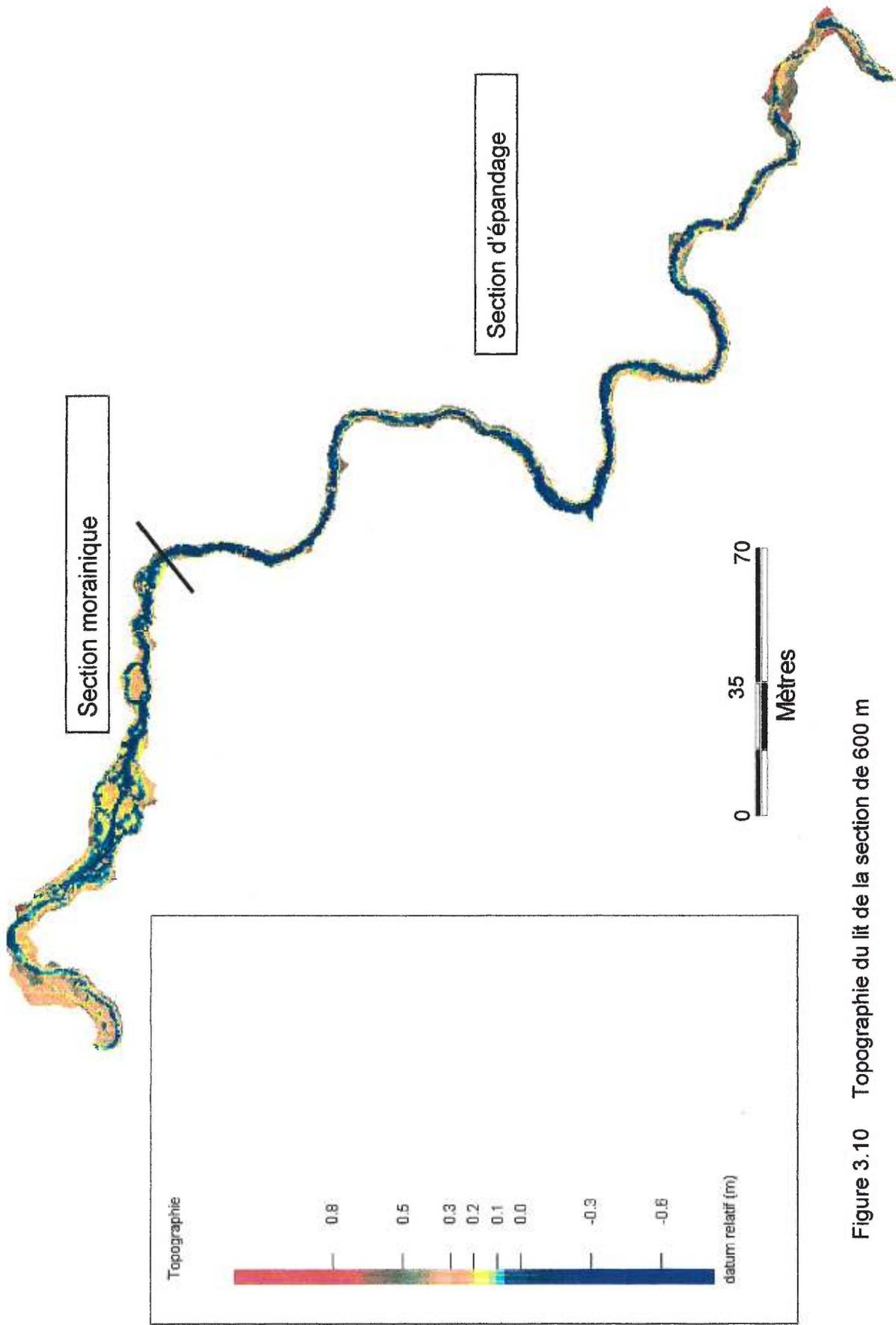


Figure 3.10 Topographie du lit de la section de 600 m

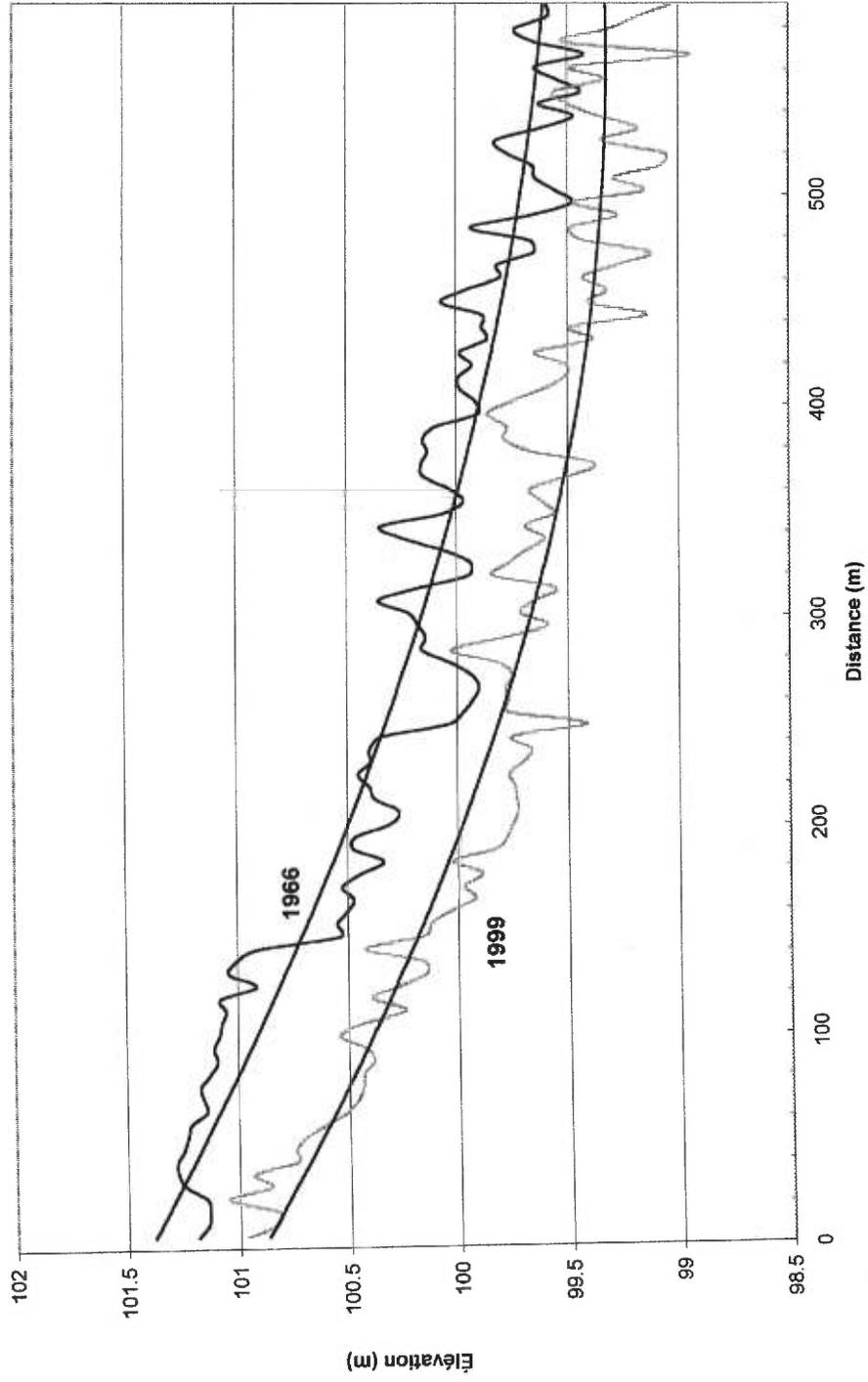


Figure 3.11 Profils longitudinaux de 1966 et 1999

On note aussi la présence d'une augmentation substantielle de la pente dans la section morainique (Pente moyenne: morainique 0,5%; épandage: 0,1%)

En 1999, la différence entre les deux sections, dans l'amplitude et la fréquence des fluctuations d'élévations demeure. Dans la section d'épandage, la fréquence est plus grande traduisant la présence de mouilles plus nombreuses et profondes. Par contre, la transition entre la portion morainique et celle de la plaine d'épandage est plus graduelle même si la pente est la même qu'en 1966 (le bris de pente de 1966, à 120m, n'existe plus). (Pente moyenne: morainique 0,5%; épandage: 0,07%)

Les deux profils permettent de caractériser l'évolution du segment de rivière. En 32 ans, les mouilles ont migré de sorte que les emplacements des portions plus profondes en 1966 correspondent la plupart du temps à des zones moins profondes en 1999. En effet, en regardant le profil de 1966 et en le comparant pour la même distance au profil de 1999, on s'aperçoit que le type de morphologie (seuils ou mouilles) a complètement changé. Le meilleur exemple se retrouve vers 320m où en 1966 il y avait une mouille qui est remplacée par une zone d'accumulation en 1999. Aussi, en comparant les élévations des deux profils dans la section d'épandage, on remarque que les mouilles sont devenues plus petites en 1999, mais plus nombreuses tel qu'observé sur la Figure 3.9. Il y a aussi des "substitutions" de morphologie sur le lit de la rivière.

Bien qu'informatrice, cette analyse visuelle des profils longitudinaux, peut être raffinée par une analyse quantitative des différences entre les élévations. La Figure 3.12 présente la courbe des différences d'élévations ainsi que celle des différences cumulées des élévations. Il est à noter que les deux courbes ont été réalisées à partir des élévations après avoir extrait la pente générale du lit. Sur la Figure 3.12, la ligne grise correspond à la différence des élévations. Par conséquent, cette courbe indique les endroits où il y a eu de l'érosion (en dessous de zéro) ou de l'accumulation (au dessus de zéro). Encore une fois, la différence entre les deux sections géomorphologiques est très franche.

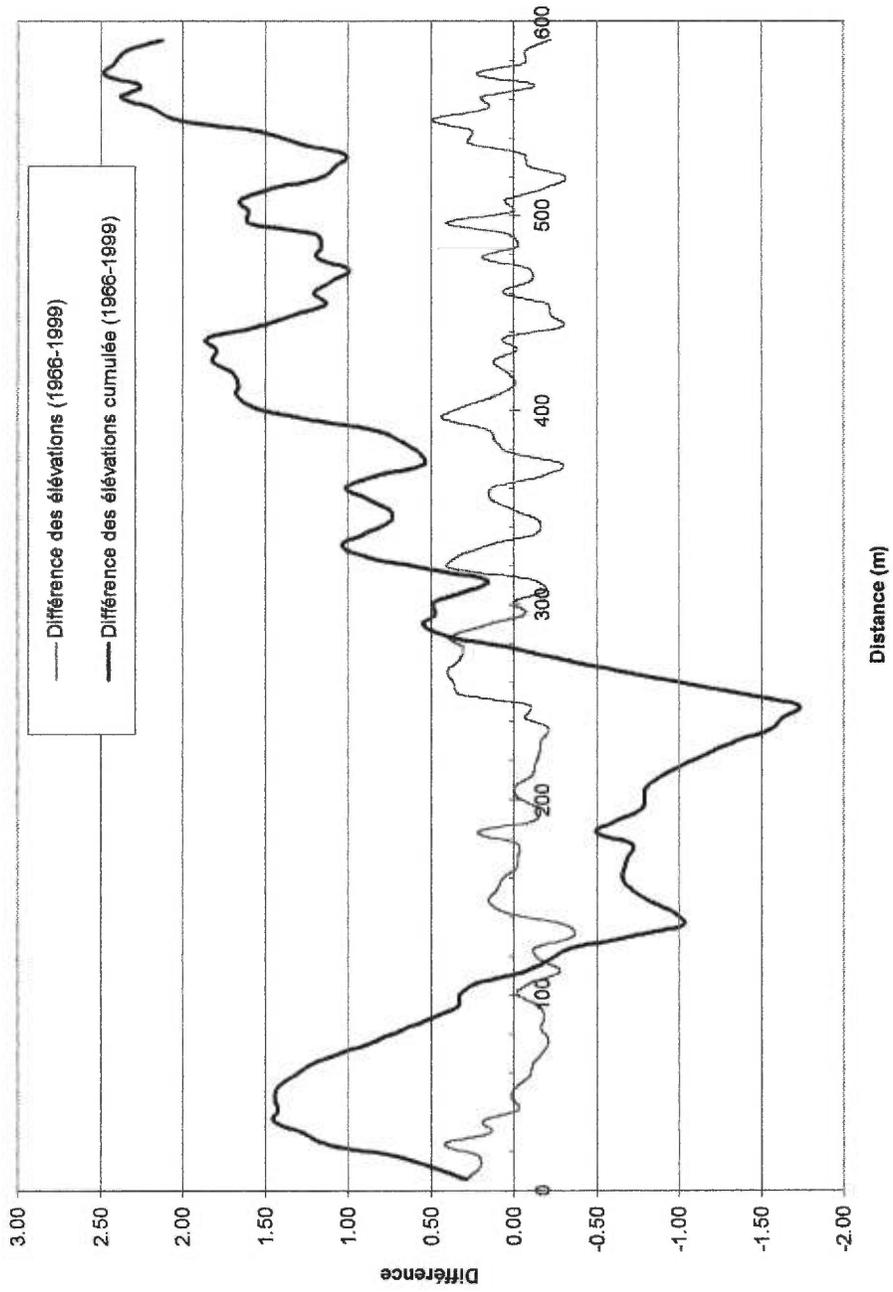


Figure 3.12 Courbes des différences et des différences cumulées des élévations

Dans la section morainique, on voit qu'il y a eu plus d'érosion que d'accumulation. Par contre, dans la section d'épandage, il est plus difficile d'affirmer qu'un processus est plus dominant que l'autre, malgré une légère tendance vers l'accumulation, surtout dans la partie aval de cette section. Les zones d'accumulation y semblent plus grandes que les zones d'érosion.

La courbe des différences cumulées des élévations permet de reconstituer un bilan de l'érosion et de l'accumulation le long du profil. Lorsque la courbe est en dessous de zéro, il y a un surplus d'érosion par rapport à l'accumulation et vice-versa. Puisque la courbe est cumulée, on peut l'interpréter comme le bilan sédimentaire en chaque point le long du profil. Des tendances nettes sur la section de 600m sont identifiées. Deux zones ressortent de l'analyse et correspondent aux passages de la courbe à 0 où le bilan net est nul. Ainsi, quand la courbe monte, il y a de l'accumulation et quand elle descend, il y a de l'érosion. La première zone, s'étend de 50 à 260m. Dans cette zone, située dans la section morainique, la tendance générale est à la dégradation (érosion). Dans l'autre zone, la deuxième, (de 260 à 600m), située dans la section d'épandage, la tendance générale est à l'aggradation (accumulation).

La zone de 0 m à 50m, dans la section morainique, a connu une accumulation de sédiments assez importante depuis 1966. Il est important de mentionner qu'en amont de cette section se trouve une zone d'épandage glaciaire similaire à celle de la présente étude et dans laquelle la rivière a été aménagée de la même manière. Il n'est donc pas étonnant de voir que cette zone d'environ 50 m de long à l'entrée de la section morainique, ait un comportement semblable à la section d'épandage étudiée ici.

Les résultats de la première zone (50 m à 260 m dans la section morainique) ne sont pas surprenants à la lumière des précédents résultats. Par contre, il était impossible de connaître l'ordre de grandeur des changements, puisque les composantes de l'habitat qui ont été mesurées ne le permettaient pas. Aussi, malgré le fait que les superficies du lit occupées par le gravier auraient pu être un bon indicateur des changements, celles-ci sont demeurées relativement stables, ce qui suggère un apport constant de sédiments provenant de la section morainique. Par contre, Figure

3.12 démontre bel et bien une érosion importante dans cette section. Ce résultat laisse à penser que le bilan sédimentaire n'est pas dans un état stable, c'est-à-dire que le bilan de ce qui entre comme sédiments est égal à ce qui sort (en volume). Ainsi, la courbe des différences cumulées des élévations serait un bon indicateur de la stabilité d'une rivière. En effet, la stabilité dans le bilan érosion/accumulation voudrait dire que les élévations demeurent relativement près de zéro. Ainsi, l'échelle spatiale de la courbe cumulée nous permet de faire ressortir de fortes tendances malgré le fait que nous avons des données sur 600 m au lieu des 1600 m de la rivière. Il est clair que la tendance n'est pas près du zéro pour les deux sections. C'est pour cette raison que nous pouvons affirmer que la rivière n'est pas en équilibre.

Il y a dégradation surtout dans la section morainique. Ceci permettrait de comprendre les résultats obtenus pour l'habitat physique dans chacune des deux sections. Les aménagements semblent ne pas apporter une stabilité du cours d'eau et l'habitat physique se dégrade de même que le lit de la rivière. Il est difficile pour les structures de contraindre la rivière sur la largeur et ainsi d'apporter une certaine stabilité à cause de la granulométrie des sédiments et de la pente du lit qui rendent la section plus dynamique.

Les résultats des profils en long de la Lawrence Creek ont mené à une étude approfondie des conséquences de ces changements sur l'habitat physique. Pour mettre en relation les changements morphologiques et l'habitat, la distribution spatiale des mouilles a été utilisée. La Figure 3.13 présente la distribution spatiale des mouilles pour les trois années. Sur la figure, nous avons indiqué les distances le long du talweg afin de pouvoir faire référence aux changements observés sur les profils en long. En 1966, les mouilles se retrouvent généralement le long des structures et certaines petites mouilles (en forme de croissant) sont associées à de gros obstacles implantés sur le lit de la rivière.

En 1999, des changements dans la distribution spatiale des mouilles ressortent. Premièrement, les mouilles ne suivent plus les structures et ont tendance à devenir

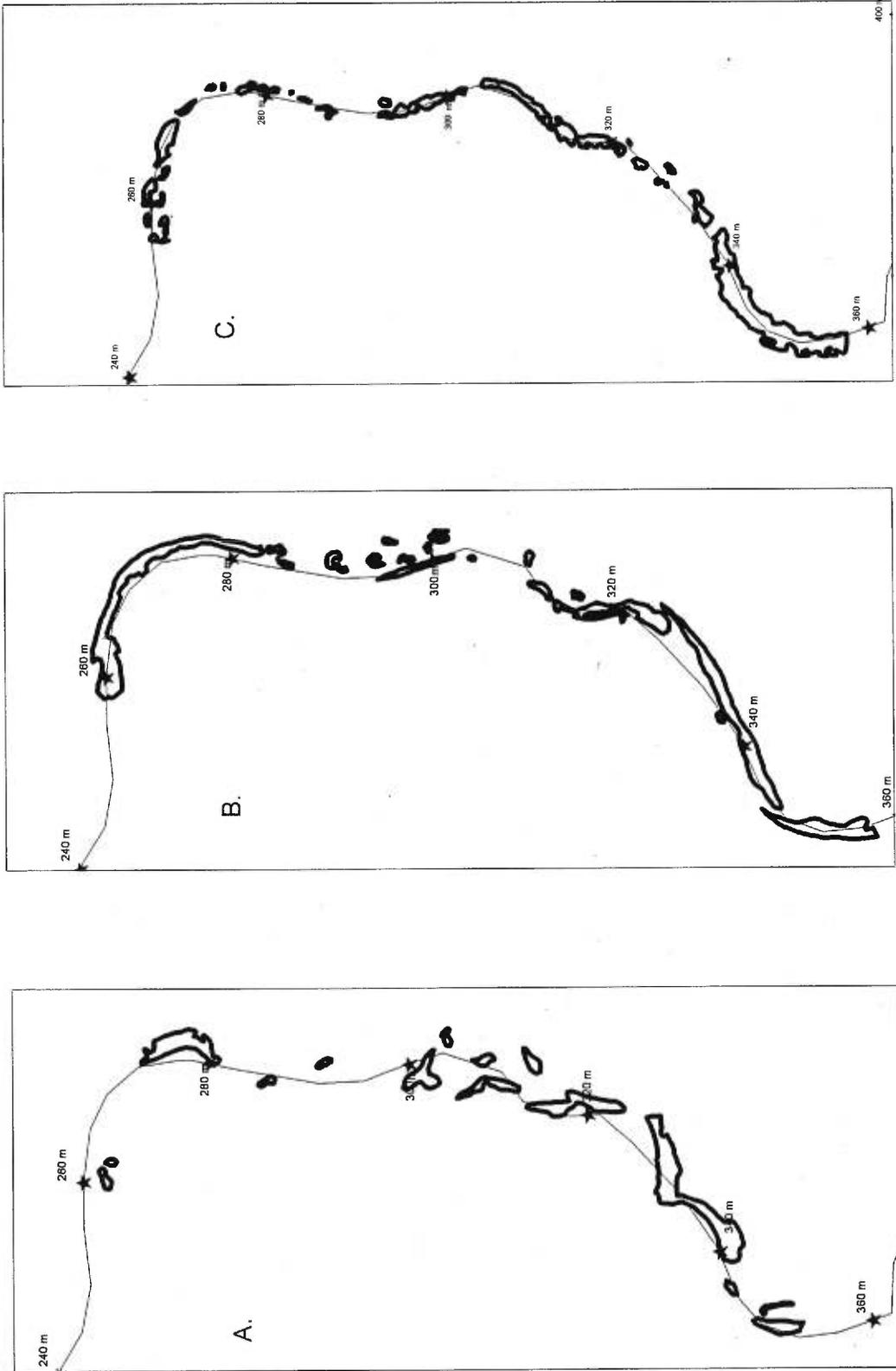


Figure 3.13 Distribution spatiale des mouilles dans une section A. en 1963 B. en 1966 C. en 1999

plus larges, surtout entre 220m et 260m. En aval, il y a une fragmentation des mouilles comparativement à la situation de 1966.

Ce changement peut être lié à une accumulation de sédiments comme le suggère la courbe des différences cumulées des élévations (Figure 3.12) entre 250m et 300m, qui présente une situation d'accumulation. Cette accumulation a pour conséquence de fragmenter les mouilles qui se trouvent dans cette partie de la rivière. C'est aussi pour cette raison que le nombre de mouilles a augmenté entre 1966 et 1999, mais sans pour autant en augmenter les superficies. (Figure 3.9).

3.5 Indicateurs hydrauliques

Pour expliquer les changements morphologiques qui se sont produits entre 1966 et 1999, nous avons recours à certains indicateurs hydrauliques. À partir des données topographiques de 1999, nous avons estimé les vitesses moyennes de l'écoulement avec l'équation de Manning (équation 6) et les contraintes de cisaillement.

Afin de savoir si les estimations des vitesses par l'équation de Manning sont réalistes par rapport au terrain, celles-ci ont été comparées à des vitesses mesurées sur le terrain. Les vitesses calculées par l'équation de Manning sont des vitesses moyennes pour une section transversale de la rivière. Ces sections sont géoréférencées. Par contre, pour les contraintes de cisaillement, aucune comparaison n'a pu être établie, puisqu'il est très difficile de les mesurer sur le terrain. La Figure 3.14 montre la comparaison entre les vitesses estimées et celles mesurées sur le terrain. Les résultats des estimations de vitesses sont généralement inférieures aux vitesses mesurées sur le terrain. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'équation de Manning permet d'obtenir de bonnes estimations à l'intérieur d'une section et non pas pour une estimation ponctuelle comme le montre les résultats des tests (test-t et corrélation) du Tableau 3.3. Il existe une concordance entre les deux séries de vitesses, c'est-à-dire que lorsque l'écoulement est moins rapide ou plus rapide, généralement,

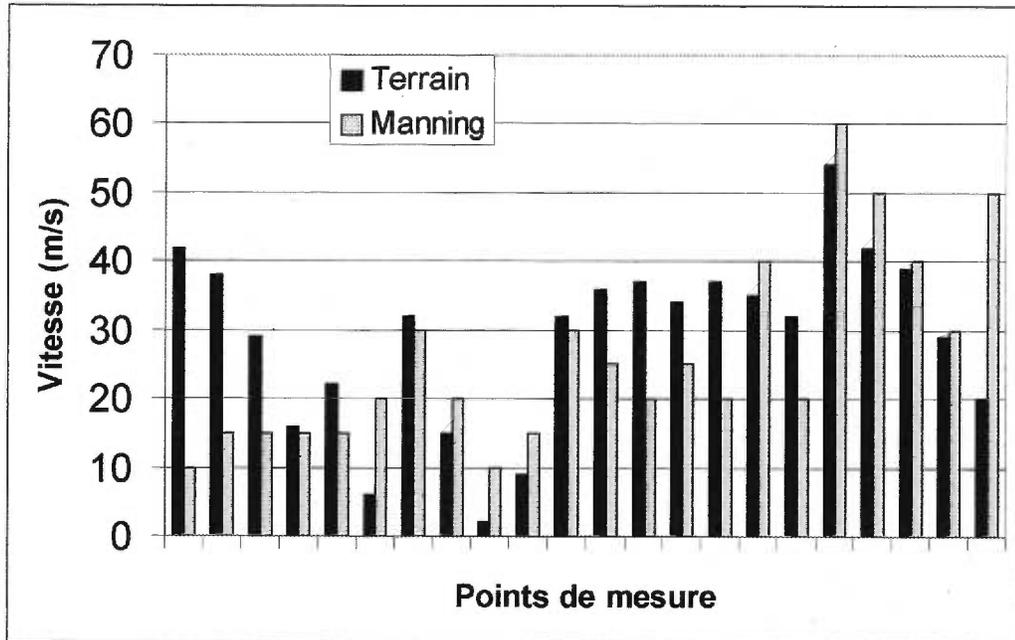


Figure 3.14 Comparaison des vitesses moyennes mesurées sur le terrain et des vitesses estimées par l'équation de Manning (en m/s)

les deux vitesses seront dans le sens du changement (accélération ou décélération). Ainsi, les estimations de vitesses à l'aide de l'équation de Manning permettent d'obtenir un portrait de la variabilité dans le champ de vitesse de la rivière.

	Moyenne	Écart-type
Terrain (n=25)	29.00	13.02
Manning (n=25)	26.14	13.88
Test-t	0.98*	
Corrélation R ²	0.24	

* non-significatif à 0.05

Tableau 3.3 Analyse statistique des deux méthodes de prises de vitesse (terrain et Manning)

La Figure 3.15 présente les estimations de vitesses moyennes (A), des contraintes de cisaillement (B) ainsi que la valeur de la profondeur (C). Comme on doit s'y attendre, les vitesses les plus rapides se retrouvent dans la section d'épandage dans les zones de plus grande profondeur et de pente plus faible (l'équation de Manning considère que la vitesse est proportionnelles à la profondeur à l'exposant 2/3 fois la pente à l'exposant 1/2, ainsi la profondeur affecte plus la vitesse que la pente). Dans cette section, la largeur de la rivière est plus faible due à l'installation des structures qui avaient pour but de restreindre la largeur du chenal. Ainsi, les vitesses seront plus élevées pour compenser la perte de largeur. Par contre, dans la section morainique, les vitesses estimées sont plus faibles de même que les profondeurs.

Les valeurs des contraintes de cisaillement sont plus fortes dans la section morainique. Malgré le fait que dans cette section les vitesses soient faibles, on peut apercevoir une concentration de vitesses plus rapide vers le centre du chenal. Ici, les pentes du lit deviennent importantes et contribuent à l'augmentation des contraintes (contrairement à l'équation de Manning, la pente et la profondeur sont à l'exposant 1, ils ont donc le même poids). Les fortes contraintes dans la section morainique expliquent l'intensité des changements morphologiques observés dans cette section.

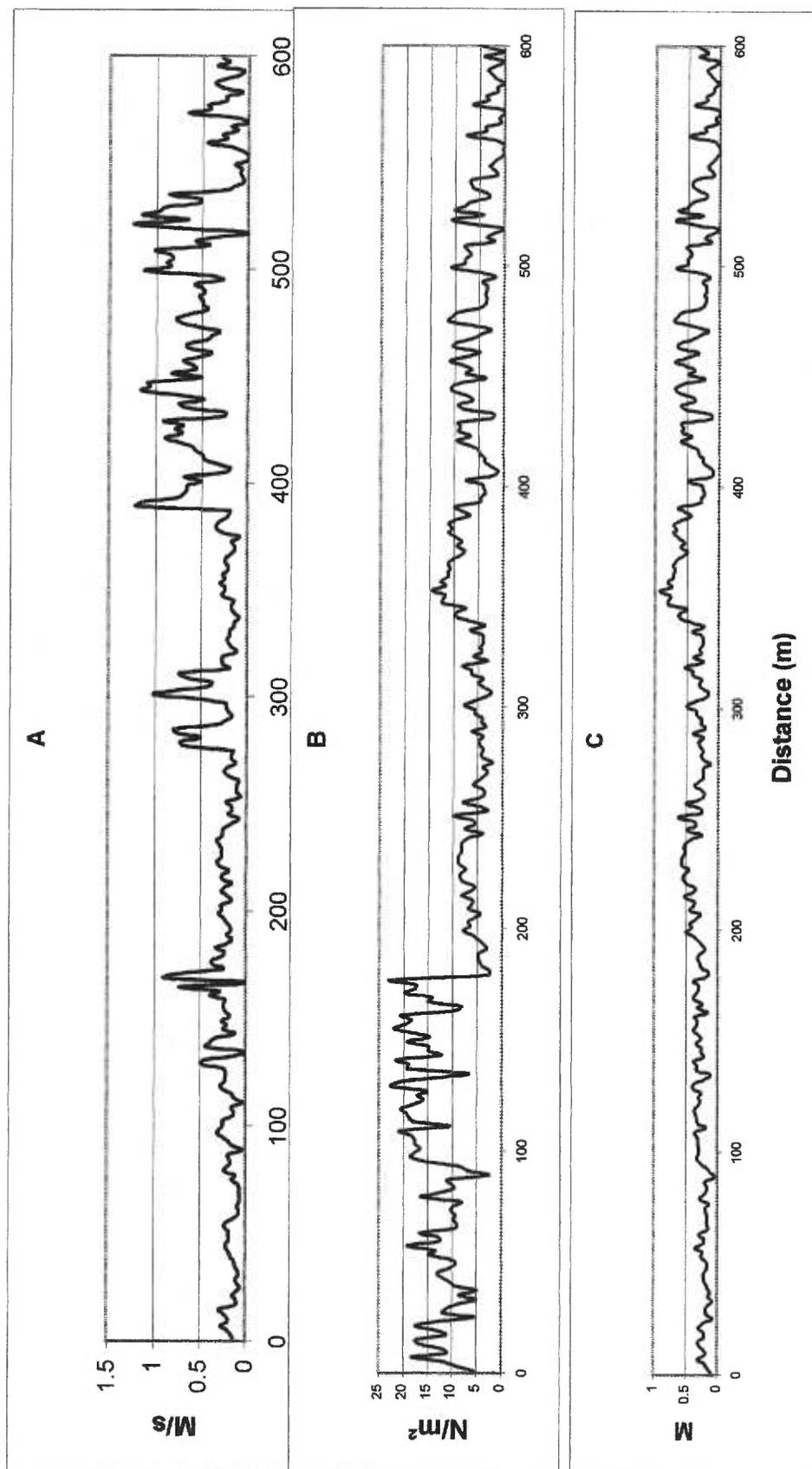


Figure 3.15 A. Vitesse moyenne estimée (m/s) B. Contrainte de cisaillement (N/m²) C. Profondeur (m) le long du talweg

L'élargissement de la rivière est compatible avec la plus grande taille du substrat dans cette section de la rivière. Cette relation entre la taille du substrat et la largeur de la rivière a déjà été observée (Richards, 1976). C'est aussi dans cette section que la rivière a contourné certaines structures les laissant dans une condition physique précaire.

Dans la section d'épandage, les contraintes de cisaillement sont plus faibles (moyenne d'environ 8 Nm^{-2} contre 15 Nm^{-2} pour la section morainique) malgré des vitesses moyennes plus élevées de l'écoulement. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que cette section comporte beaucoup plus de structures qui sont encore en bon état. Ainsi, les structures pourraient agir comme tampon entre les berges et l'écoulement. La rugosité des structures occasionnerait un ralentissement de l'écoulement à proximité des berges ce qui déplacerait les vitesses plus rapides au centre du chenal. Ainsi, le processus dominant dans la création des mouilles ne serait pas les contraintes moyennes de cisaillement, mais un autre processus associé à l'intensité turbulente et aux structures turbulentes qui sont plus fortes au lit et près des structures.

La Figure 3.16 présente la cartographie des vitesses de l'écoulement estimées à partir de l'équation de Manning. Les zones de vitesses les plus élevées se retrouvent principalement dans les méandres les plus prononcés de la rivière. En effet, dans la section d'épandage, plusieurs méandres sont présents et comprennent d'importantes mouilles. C'est aussi dans ces méandres que plusieurs structures encore en bon état se retrouvent.

La cartographie des vitesses permet de constater qu'il existe une grande variabilité dans les vitesses de l'écoulement et ce même dans la section d'épandage. Il existe plusieurs zones d'accélération et de décélération de l'écoulement sur de courte distance. Cette variabilité des vitesses dans la rivière laisse croire qu'il s'agit d'un élément important relié aux changements notés dans l'habitat physique. La cartographie des contraintes de cisaillement montre aussi une distinction nette entre les deux sections géomorphologiques (Figure 3.17). Les contraintes dans la section morainique sont plus fortes et les indicateurs de changements sur les cartes d'habitat

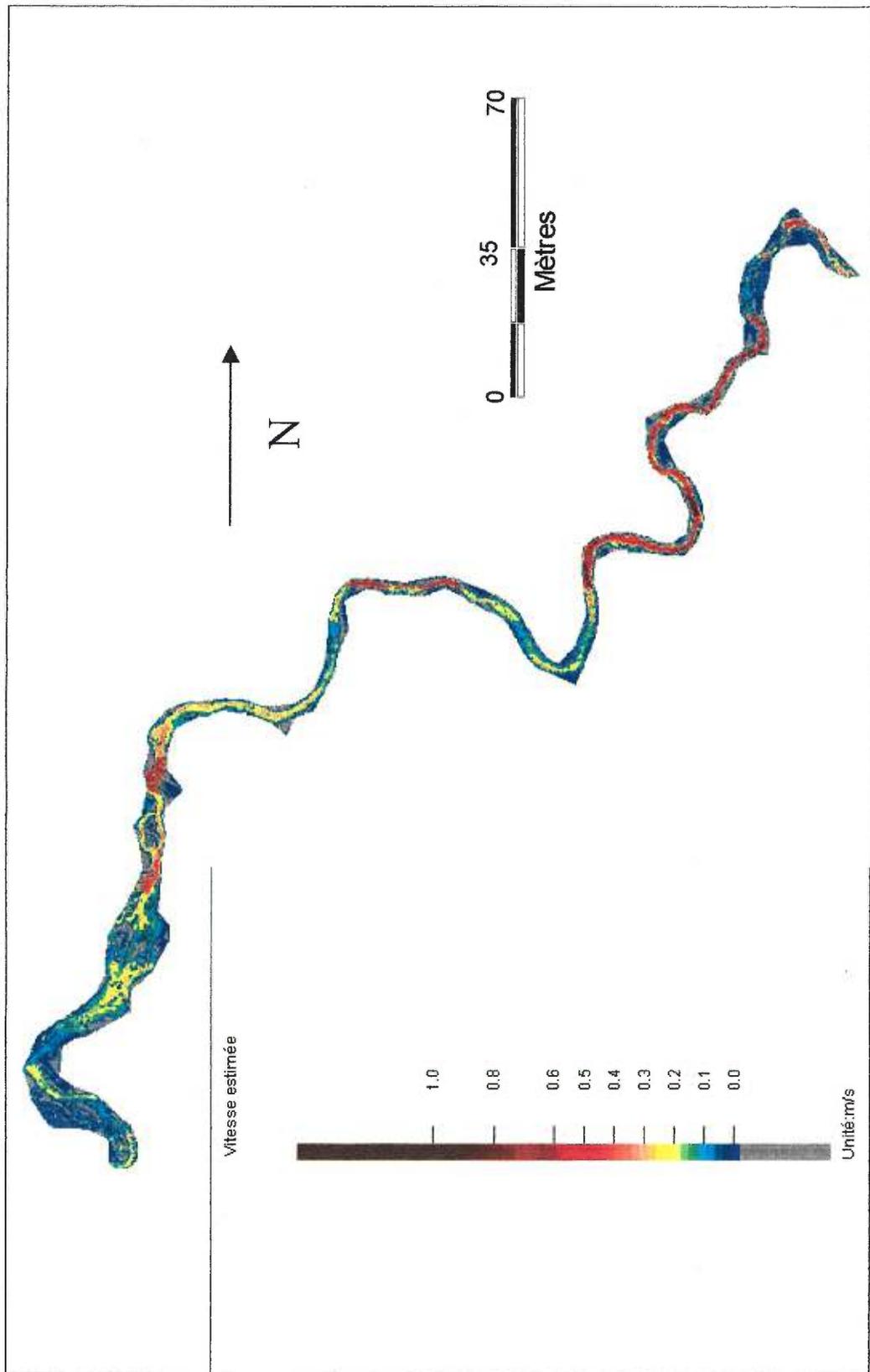


Figure 3.16 Vitesses estimées pour la section de 600 m

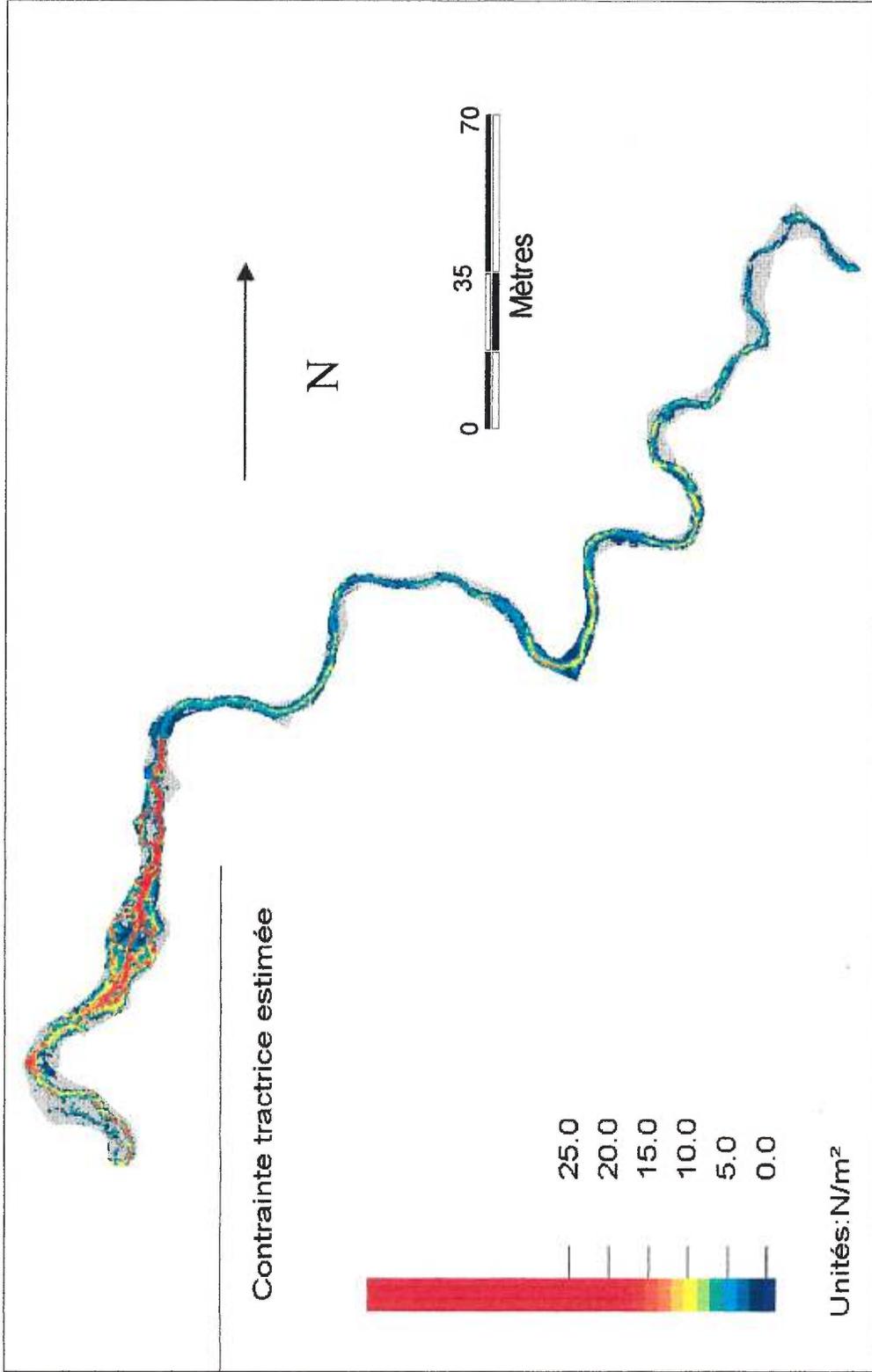


Figure 3.17 Contraintes tractrices estimées

ainsi que sur le terrain ne font que confirmer cette information. Les contraintes les plus fortes semblent être localisées au centre du chenal, mais à certains endroits, les contraintes les plus fortes longent les berges. Ainsi, l'apport de sédiments provenant de la section morainique doit être relativement important occasionnant des changements dans l'habitat physique. Généralement, dans les zones de contraintes fortes, le gravier est le substrat dominant. On présume qu'il est mis en transport et se dépose là où les contraintes deviennent moins fortes et permettent aux particules de se déposer sur le lit.

Dans la section d'épandage, la situation des contraintes de cisaillement est différente, celles-ci sont étant variables que dans la section morainique (la pente et les profondeur tendent à être plus stable). Il y a une sorte d'homogénéité dans les contraintes sauf dans les méandres les plus prononcés où il y a une faible augmentation. Il est aussi intéressant de remarquer qu'il n'y a pas de contraintes élevées le long des berges qui pourraient affecter les structures.

3.6 Carte des préférences et estimations des populations de poissons en 1999

Un autre moyen de qualifier l'habitat physique est d'utiliser les courbes de préférence de l'habitat de la truite mouchetée (*Salvelinus fontinalis*), espèce que l'on retrouve en abondance dans la Lawrence Creek. La truite mouchetée préfère un habitat ayant un bon couvert, un substrat de gravier, une vitesse de l'écoulement relativement rapide (entre 30 et 60 cm/s) ainsi qu'une température de l'eau de 10°C. Pour cette étude, la température n'a pas été mesurée pour pouvoir être prise en compte dans le calcul de l'indice. La Figure 3.18 présente la cartographie des valeurs de préférence (entre 0 et 1, 0 étant un habitat pauvre et 1, un habitat excellent) pour des combinaisons de vitesse de l'écoulement et de profondeur. Il est important de noter que cette carte n'est pas le résultat d'une modélisation de l'habitat, mais simplement une attribution de valeur de préférence pour chaque point échantillonné.

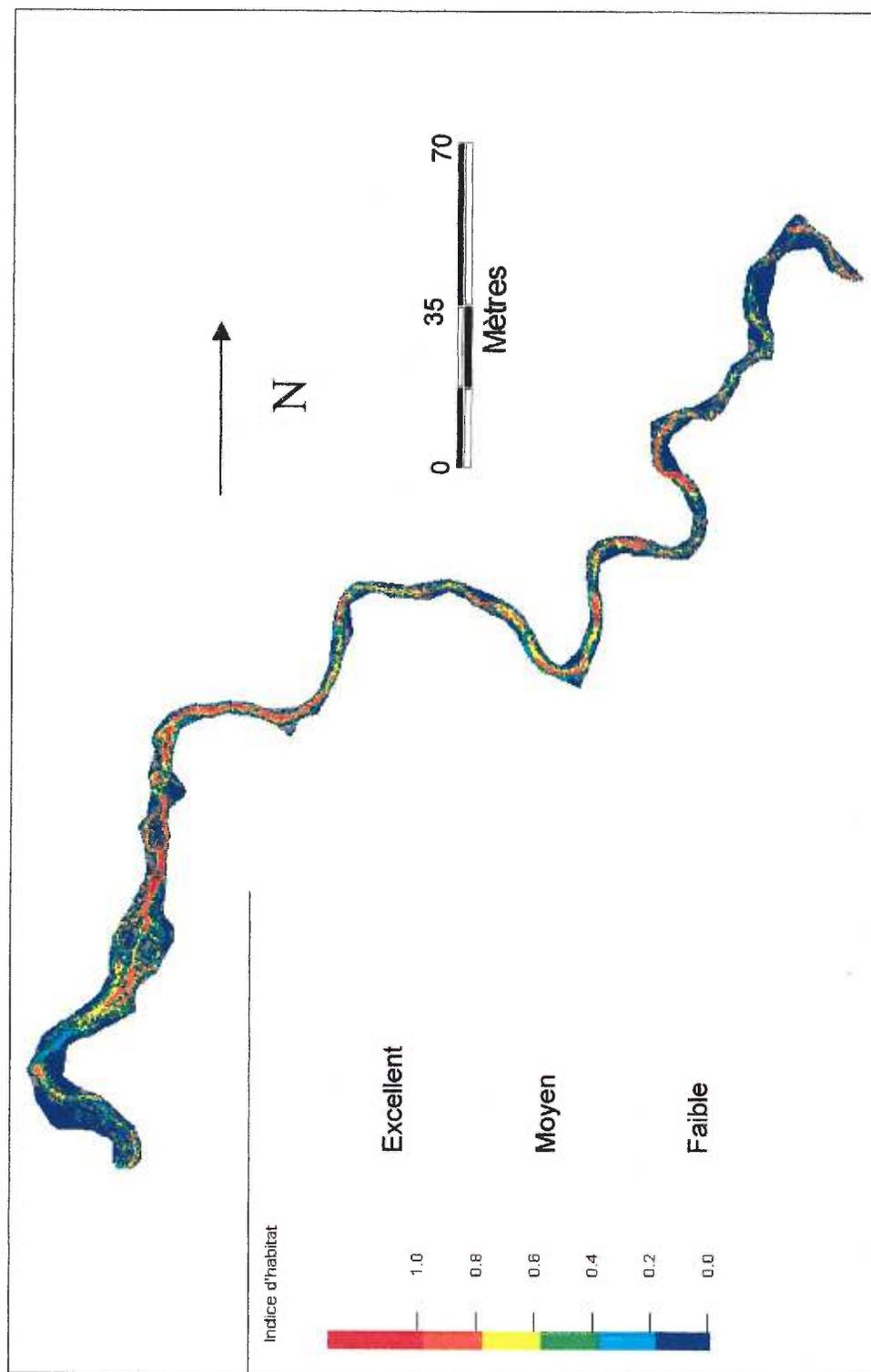


Figure 3.18 Distribution de l'indice de préférence de la truite en 1999

On remarque que par rapport à la superficie de chacune des sections géomorphologiques, il y a une plus grande quantité d'habitat "préférentiel" disponible dans la section d'épandage, là où les vitesses sont plus grandes de même que la profondeur. Dans la section morainique, il existe aussi des habitats préférentiel, mais il y a aussi une plus grande variabilité dans la qualité des habitats, généralement moins bons.

On peut noter la présence de petites zones d'habitat préférentiel dans la section morainique et une grande en aval de la section près de la section d'épandage. Il existe beaucoup de zones d'habitat préférentiel, mais il est difficile d'affirmer que ces zones sont utilisées et représentent bien les zones d'habitat du poisson à cause du faible nombre de variables utilisées (seulement deux). Par contre, cet indice permet de dresser un portrait de la variabilité des habitats, surtout entre la section morainique et d'épandage. Le meilleur moyen de quantifier cette variabilité est d'estimer les populations de poissons pour 1999 par rapport à l'habitat physique.

Avec les données de pêche électriques de la Lawrence Creek publiées par Hunt (1971), nous avons produit un modèle de régression permettant d'évaluer la population de truite mouchetée de 15 cm et plus dans la Lawrence Creek en 1999. Hunt (1969, 1971) a trouvé qu'il y avait une forte relation entre le nombre de truites de 15 cm et plus et la superficie des mouilles dans les sections de 100 m de la rivière. Ainsi, le modèle est construit à partir de données de pêche électrique pour le nombre de truites de 15 cm et plus par section de 100m pour la période de 1965 à 1967, donc après l'implantation des aménagements, et la superficie des mouilles dans chacune des sections. Par conséquent, en ayant des données pour la superficie des mouilles en 1999, il sera possible d'estimer les populations de truite de 15 cm et plus en 1999. Avant d'estimer les populations, nous avons estimé les paramètres du modèle qui correspondait le mieux aux données pour les six sections de cette étude pour la période 1965-67 (connue). La relation entre la superficie du lit occupée par les mouilles et le nombre de truites ainsi que la prédiction du nombre de truite selon le modèle de régression sont présentées à la Figure 3.19. Le modèle mathématique de prédiction de 1999 suit les tendances des données de Hunt (1971), mais nous avons

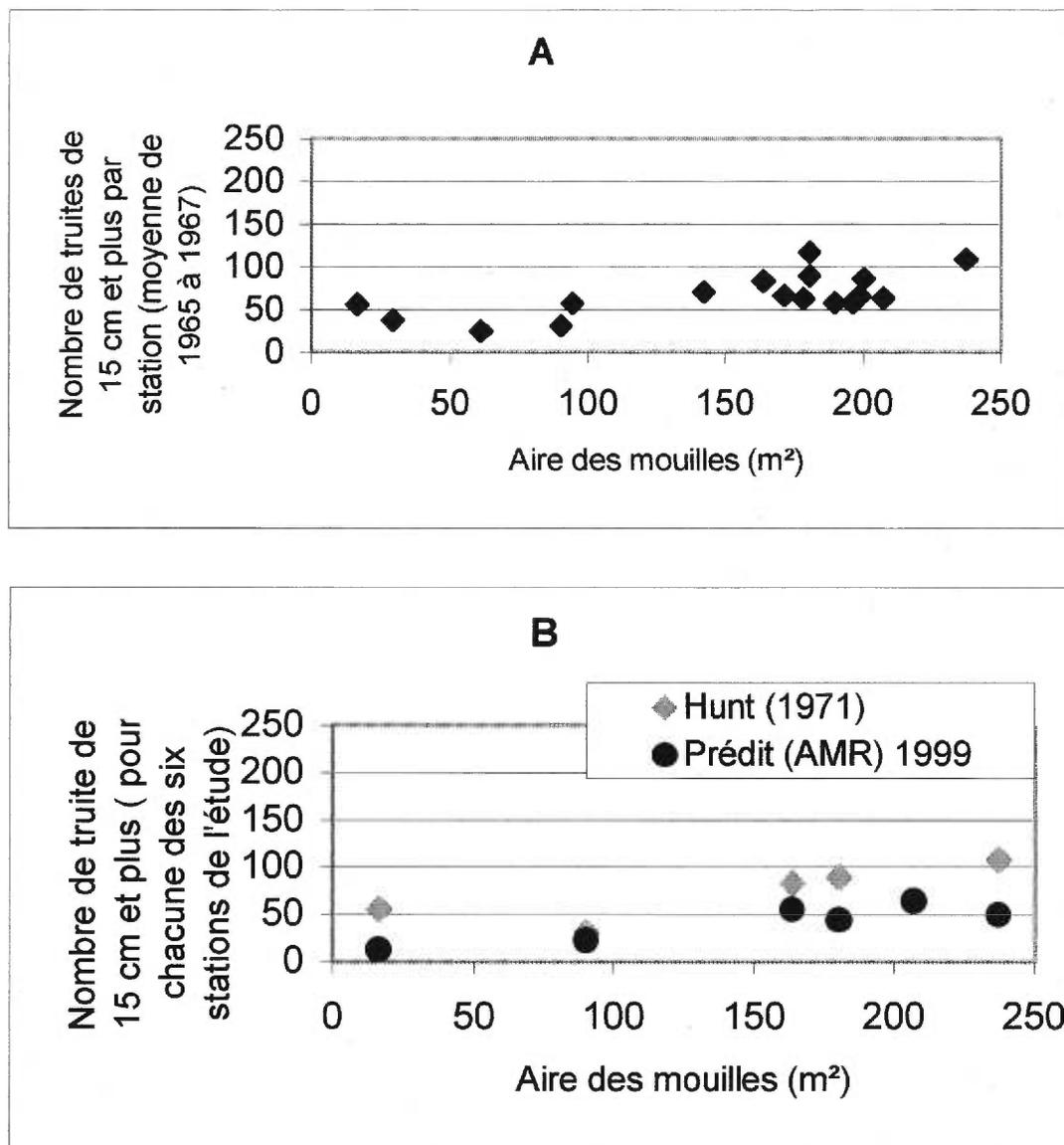


Figure 3.19 A. Relation entre l'aire des mouilles et le nombre de truites de 15 cm et plus (Hunt, 1971) B. Modèle mathématique pour la prédiction du nombre de truites de 15 cm et plus pour les six stations de l'étude.

testé cette relation pour savoir si les différences observées dans le nombre de truites sont significatives. Par contre, la relation mathématique est limitée puisque nous supposons une relation constante depuis 1966 entre la superficie des mouilles et le nombre de truites. Comme la population de 1999 est inconnue, il est difficile de prétendre que la relation est aussi forte qu'en 1966. La relation mathématique utilisée est représentée par :

$$y = 10,99 + 0,37x \quad (13)$$

où y représente le nombre de truites de 15 cm et plus et x la superficie en m des mouilles de la section

Le Tableau 3.4 montre les résultats des modèles de régression utilisés.

A. Valeurs de la régression (relation entre superficies des mouilles en m² et le nombre de truites de 15 cm et plus)

	Nb de truites de 15 cm et plus (Données de Hunt (1971))	Prédit 65-67	Prédit 99
Total	430	332	247
Moyenne par station	71,67	55,33	41,17
Écart-type	27,29	7,92	19,81
	$r^2 = 0.7$	$r^2 = 0.93$	$r^2 = 0.4$

B. Validation de la régression entre le nombre de truite pour l'année de référence (1971) et les valeurs prédites

Tests sur le total des six stations	
t_{ob} (Donnée de Hunt (1971) et prédiction (validation) (65-67))	0.77
t_{ob} (Donnée de Hunt (1971) et prédiction (1999))	5.34*
* significatif à 0,05	

Tableau 3.4 Estimations des populations de poissons par un modèle de régression et test statistique (test-t).

Le Tableau 3.4 indique que le modèle de régression représente bien la relation entre les populations de poissons et la superficie du lit occupée par les mouilles ($r^2=0.93$). Aussi, nous avons trouvé qu'il y avait une différence significative dans le nombre de

truites de 15 cm et plus entre les données de pêche électrique de Hunt (1971) et notre prédiction de 1999.

La dégradation de l'habitat a entraîné une diminution du nombre de truites dans la rivière. En 1966, il y avait 430 truites de 15 cm et plus pour les six sections comparativement à 247 la valeur estimée en 1999. Cette diminution de 42% est associée à la baisse de 22% dans la superficie du lit occupée par les mouilles (de 625 m² en 1966 à 488m² en 1999), puisque le modèle de régression est basé sur la relation entre le nombre de truites de 15 cm et plus et la superficie du lit occupée par les mouilles (r^2 entre les deux de 0,7).

3.7 Étude détaillée de l'hydraulique et de la turbulence dans une section

Le deuxième objectif de l'étude est de caractériser l'hydraulique près des structures qui ont été installées sur la Lawrence Creek. Dans la caractérisation de l'hydraulique, deux variables ont été retenues, soit la vitesse moyenne longitudinale (U), ainsi que l'intensité turbulente (itu). Les autres composantes de l'écoulement (V et W) n'ont pas été retenues dans l'analyse à cause de la faible densité des points et de la difficulté d'interpréter les données. En effet, la faible quantité de données dans les composantes V et W et leur dispersion spatiale trop grande empêche de dégager un comportement hydraulique sans tomber dans la spéculation.

Pour l'étude de la dynamique de l'écoulement nous avons choisi la section selon deux critères: premièrement, la section devait être typique des aménagements installés, c'est-à-dire une section ayant une alternance de structures qui calque la sinuosité de la rivière, et le deuxième critère était que toutes les structures en place étaient en bon état. Les résultats sont présentés sous forme de carte pour chacune des coupes transversales. La structure, lorsqu'il y en avait une, est représentée par un rectangle gris et les zones n'ayant pas été échantillonnées sont représentées par une trame de gris.

La localisation de chacune des coupes transversales est présentée sur la Figure 3.20. Le Tableau 3.5 présente les caractéristiques de chacune des coupes transversales.

Coupe transversale	Morphologie dominante	Substrat dominant	Présence de structure	Position relative par rapport à la structure
#1	Mouille	Sable	oui	Fin de la structure
#2	Mouille et gros obstacle	Gravier	non	Entre deux structures en alternance
#3	Mouille	Gravier	oui	Milieu de la structure
#4	Mouille	Gravier	oui	Début de la structure (même structure que #3)
#5	Mouille	Sable	oui	Début de la structure

Tableau 3.5 Caractéristiques des coupes transversales

La Figure 3.21 présente la carte de la vitesse moyenne longitudinale (U_{moy}) ainsi que l'intensité turbulente en U (itu) pour la coupe transversale numéro un. Pour la vitesse moyenne, on peut remarquer une concentration de vitesses plus élevées dans la partie la plus profonde de la coupe et près du lit. À l'opposé, dans la zone moins profonde, les vitesses sont plus faibles. La distribution des vitesses à l'intérieur de cette coupe transversales correspondent généralement assez bien aux observations faites dans les méandres par Hooke (1975), Dietrich et *al.* (1979) et Bridge et Jarvis (1982). La berge extérieure d'un méandre possède les plus grandes vitesses et une mouille s'y forme à cause des contraintes de cisaillement plus élevées (Hooke, 1975).

Les plus fortes valeurs d'intensité turbulente se retrouvent dans la mouille et près du lit. Malgré cela, de fortes valeurs se retrouvent aussi à l'opposée dans la portion moins profonde de la coupe. Au centre, les valeurs de l'intensité turbulente ne sont pas très élevées par rapport aux autres valeurs de la coupe.

La Figure 3.22 présente l'hydraulique de la coupe transversale numéro deux. Dans cette coupe rectangulaire, aucune structure n'était présente, mais un gros bloc en plein centre du chenal était placé un peu en amont de la coupe. L'écoulement le plus rapide est du côté gauche, puisque qu'il sort du méandre précédent. Par contre, les vitesses

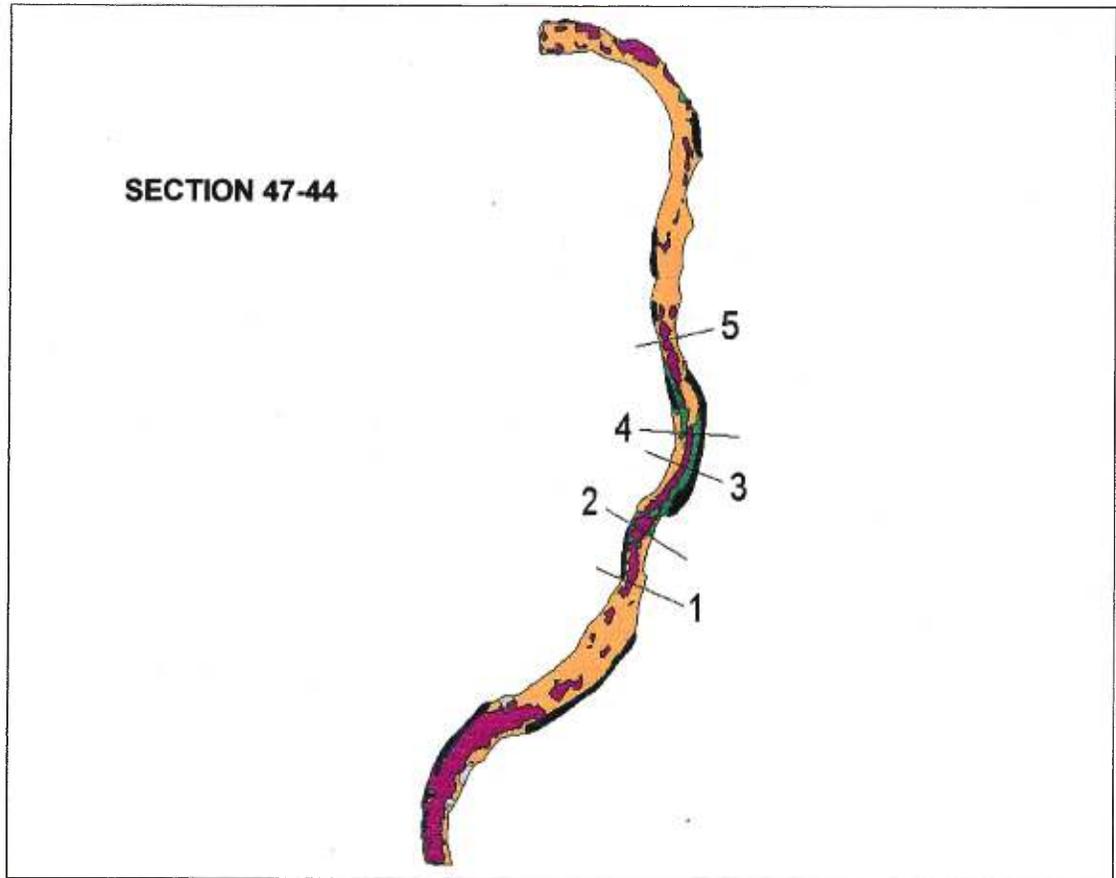


Figure 3.20 Localisation des coupes transversales

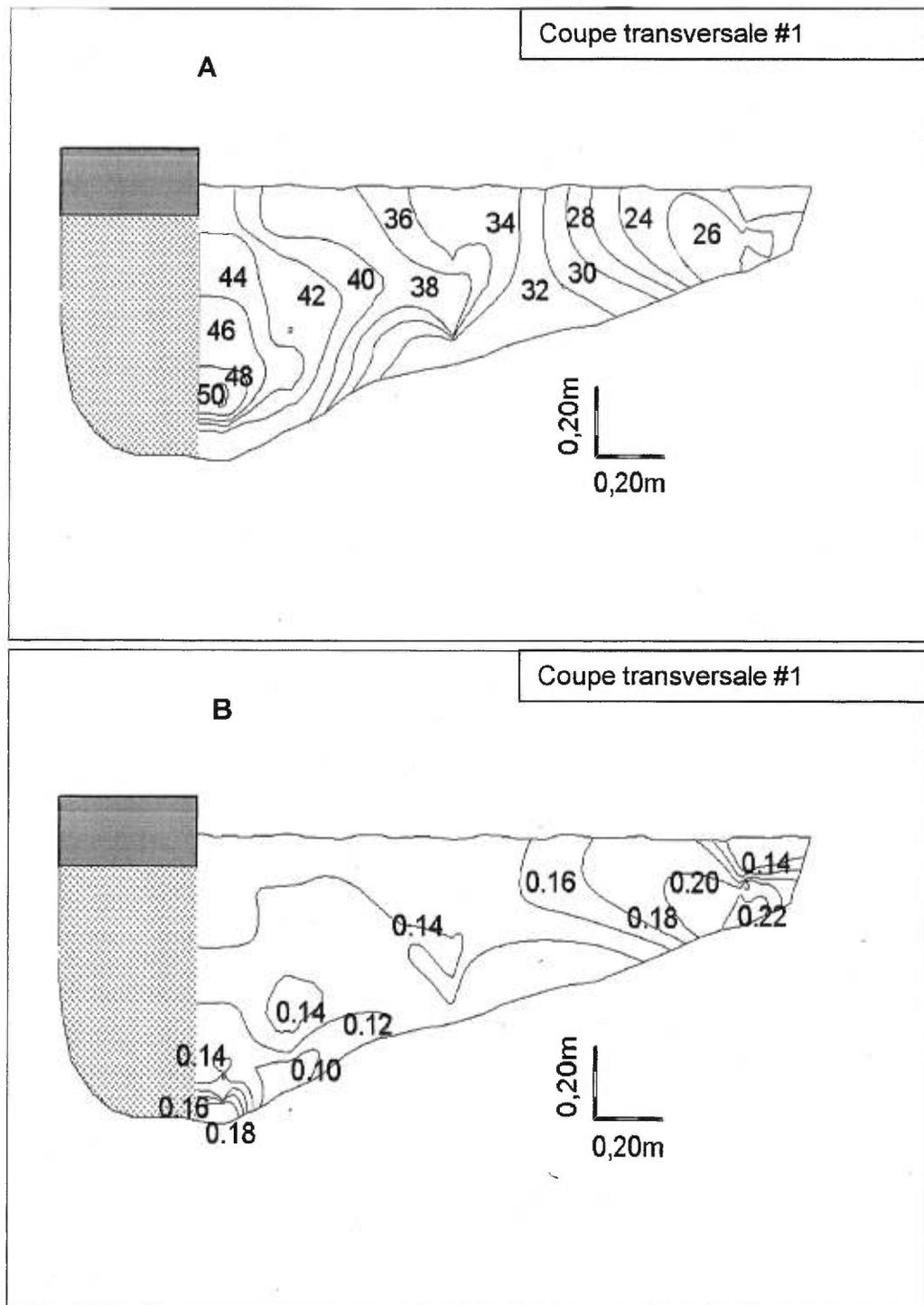


Figure 3.21 A. Vitesse longitudinale moyenne (cm/s) B. Intensité turbulente

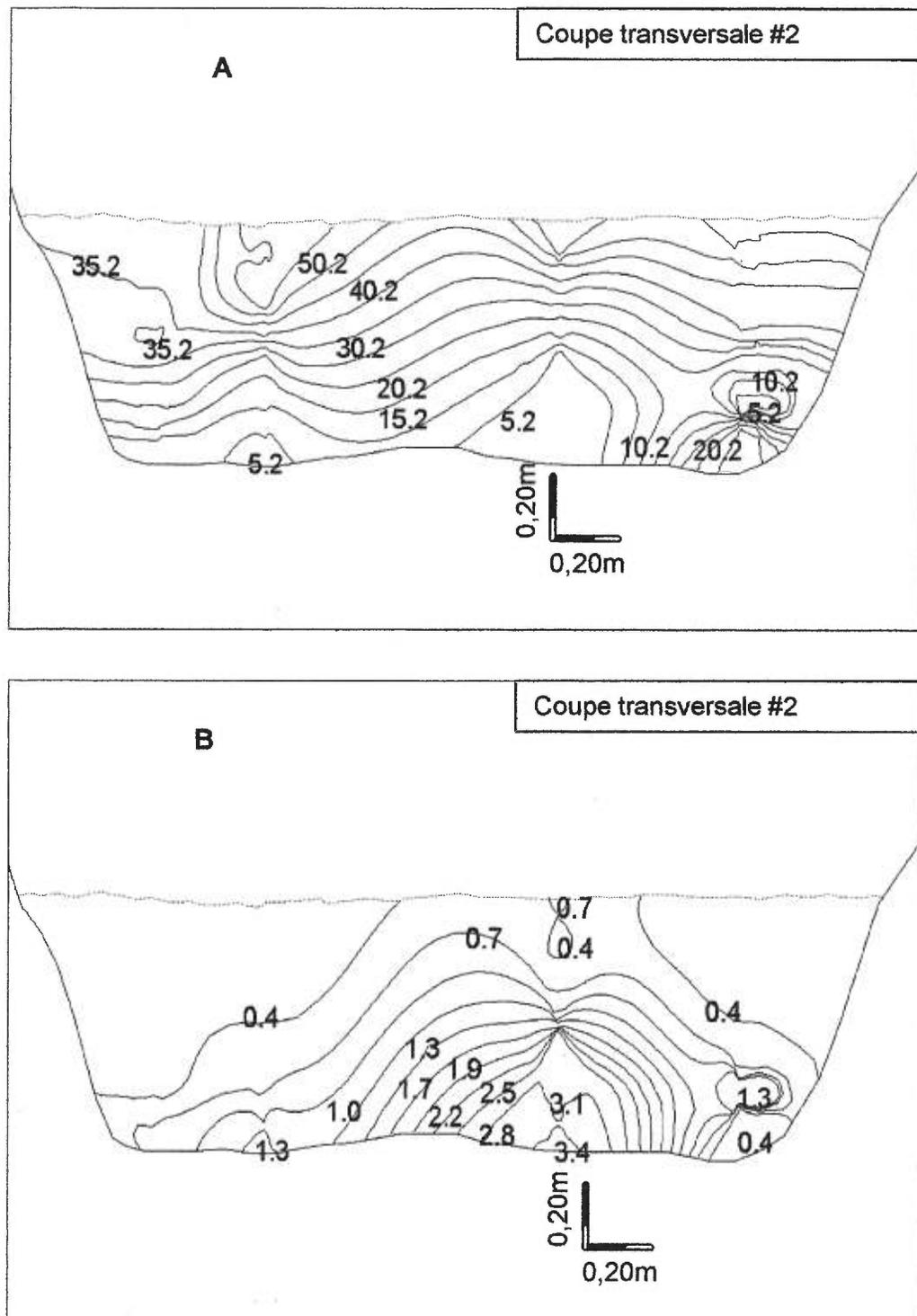


Figure 3.22 A. Vitesse longitudinale moyenne (cm/s) B. Intensité turbulente

les plus fortes se retrouvent en surface et non plus au niveau du lit. Il semble qu'il y ait eu une transition dans l'écoulement entre les deux coupes. Les valeurs de vitesses les plus faibles se retrouvent au lit et augmentent graduellement vers la surface, le champ de vitesse se comporte donc comme le prévoit la loi du mur. Les profils de vitesse ont tendance à être logarithmiques.

Pour l'intensité turbulente, la présence du gros obstacle se fait sentir. Les valeurs les plus fortes se retrouvent dans la zone d'influence du bloc où il est maintenant bien connu que l'intensité turbulente est plus forte (Buffin-Bélanger et Roy, 1998), de même que vers la surface.

La distribution des vitesses moyennes à l'intérieur la troisième coupe, suit encore une fois les observations faites sur les méandres en milieu naturel ainsi qu'en laboratoire (Figure 3.23). La zone de vitesses rapides se retrouve en plein centre de la coupe et non pas près de la structure comme pour la coupe numéro un. Par contre, près de la structure, en surface, il y a une zone de vitesses faibles. Ceci est probablement le résultat de la friction avec la structure qui ralentit l'écoulement. Il est intéressant de noter que le long de la structure, de la surface vers le lit, il existe deux poches de vitesses lentes qui sont séparées par une zone de vitesse plus rapide. La même chose se produit avec l'intensité turbulente. Malgré le fait qu'il y a des vitesses plus faibles près de la structure (en surface et au lit), c'est à cet endroit qu'il y a l'intensité turbulente la plus forte.

La Figure 3.24 montre les résultats pour la coupe transversale numéro quatre. Encore une fois, la zone de vitesses rapides se retrouve en plein centre du chenal. Deux "poches" de vitesses plus faibles se retrouvent près de la structure, en surface et au lit. C'est aussi à ces endroits que l'intensité turbulente est la plus élevée. Il y aussi une autre zone d'intensité turbulente élevée à l'opposé de la structure là où la topographie change brutalement de même que les vitesses.

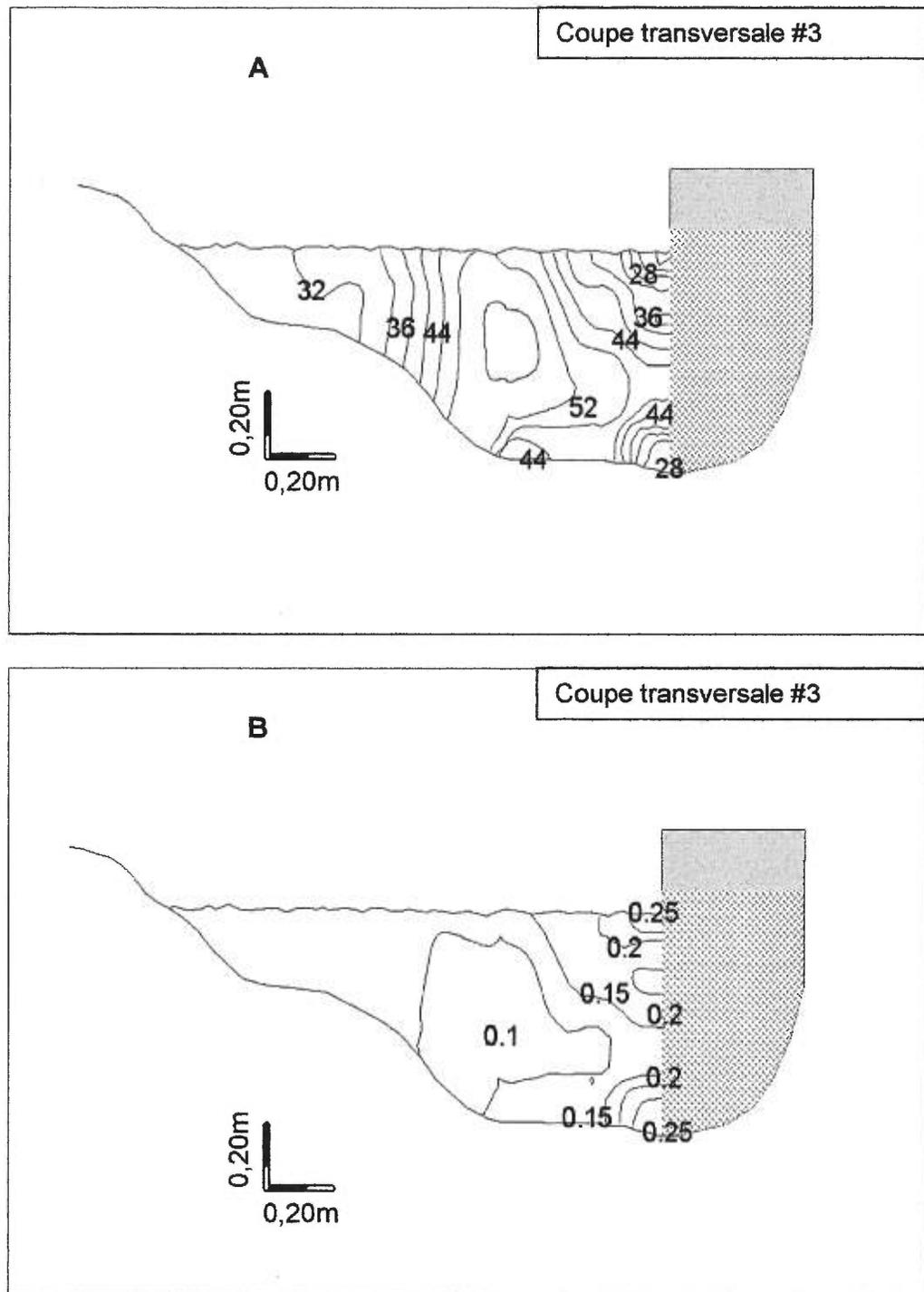


Figure 3.23 A. Vitesse longitudinale moyenne (cm/s) B. Intensité turbulente

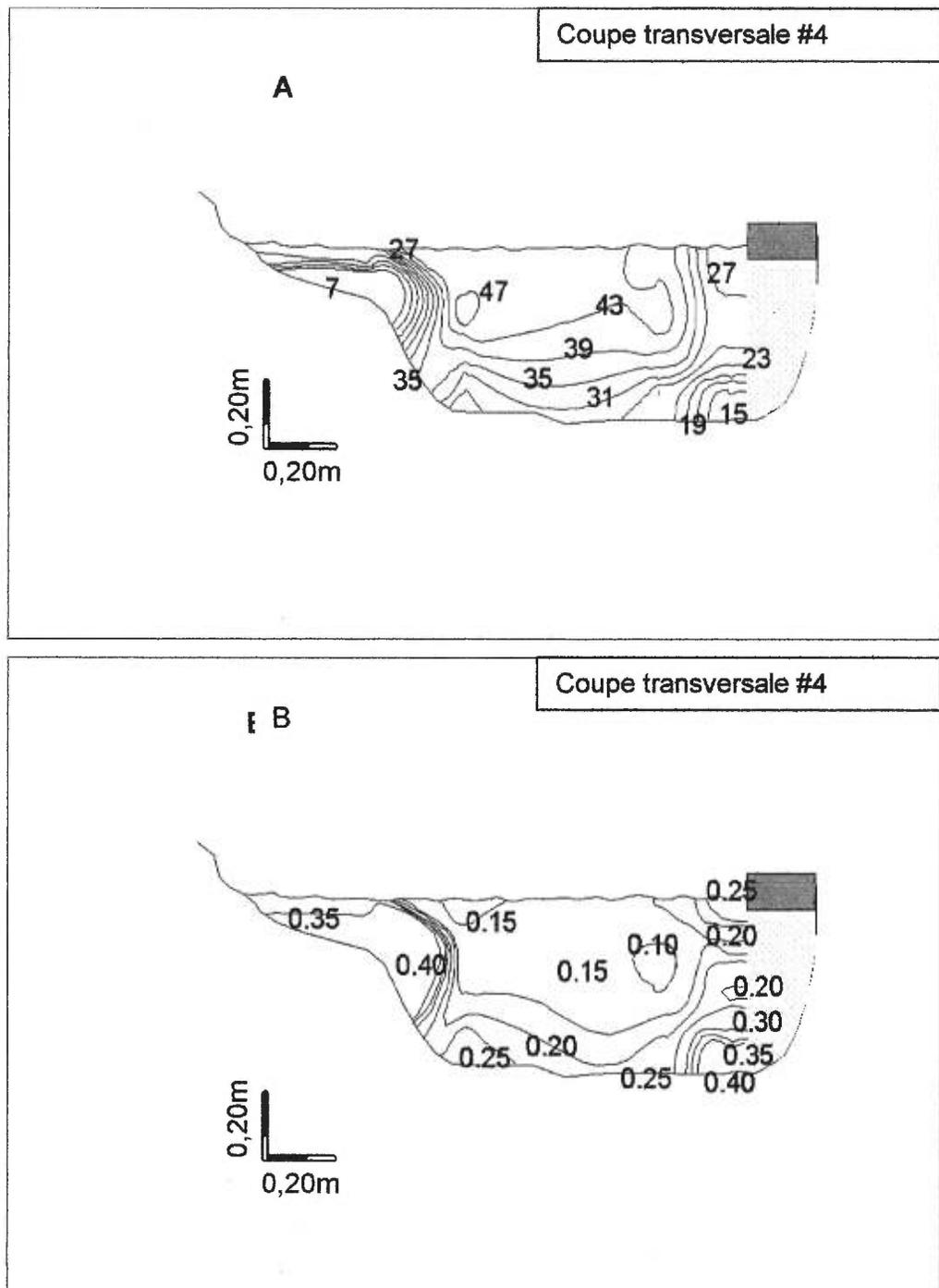


Figure 3.24 A. Vitesse longitudinale moyenne (cm/s) B. Intensité turbulente

La Figure 3.25 présente l'hydraulique pour la coupe transversale numéro cinq. Encore une fois, les vitesses les plus élevées se concentrent vers le centre et près de la surface de la coupe. Près de la structure, en surface et près du lit, les deux zones de plus faibles vitesses sont encore présentes et sont toujours séparées par une zone de vitesses plus rapides. Par contre, pour cette coupe, une seule zone d'intensité turbulente élevée se retrouve près de la structure tandis que pour le reste de la coupe, les valeurs sont semblables.

Certaines généralisations peuvent être tirées des observations de toutes les coupes transversales. Premièrement, les vitesses suivent généralement le patron attendu par la littérature, c'est-à-dire que la zone de vitesse plus rapide se retrouve près du centre et de la surface de la coupe. De plus, les vitesses sont plus faibles au lit et augmentent graduellement près de la surface. Ceci est vrai pour toutes les coupes échantillonnées sauf près des structures où l'écoulement est plus faible au lit et en surface.

Deuxièmement, les zones d'intensité turbulente les plus fortes se retrouvent toujours près des structures, en surface et au lit. La Figure 3.26 illustre la moyenne de l'intensité turbulente selon trois positions. La position dite de *surface* correspond au tiers supérieur de la tranche d'eau, la position *centre* le deux tiers et le *lit* au dernier tiers de la tranche d'eau. Pour chacune des positions, l'intensité turbulente a été relevée selon une distance par rapport à la structure. La distance *près* était la distance à l'intérieur de 30 cm et la distance *loin*, plus de 30 cm.

Ainsi, il a été possible de créer un quadrillage pour chacune des coupes et de calculer la moyenne de l'intensité turbulente. La compilation des moyennes de l'intensité turbulente indique que près du lit et près de la structure, la moyenne est beaucoup plus forte que pour n'importe quelle autre position. Aussi, on remarque que près de la structure et de la surface, les valeurs sont aussi élevées, mais un peu moins significatives par rapport à la position du centre.

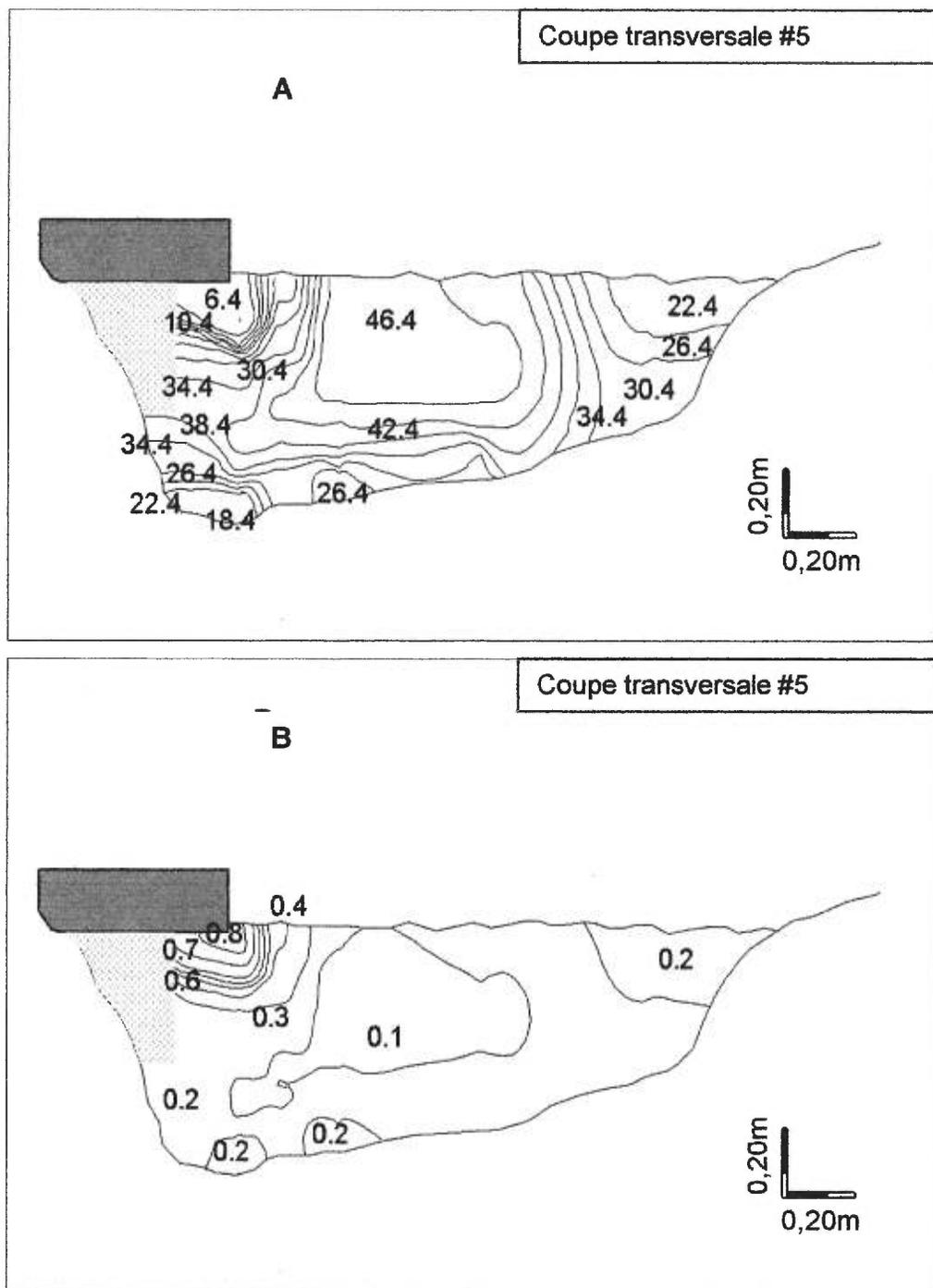


Figure 3.25 A. Vitesse longitudinale moyenne (cm/s) B. Intensité turbulente

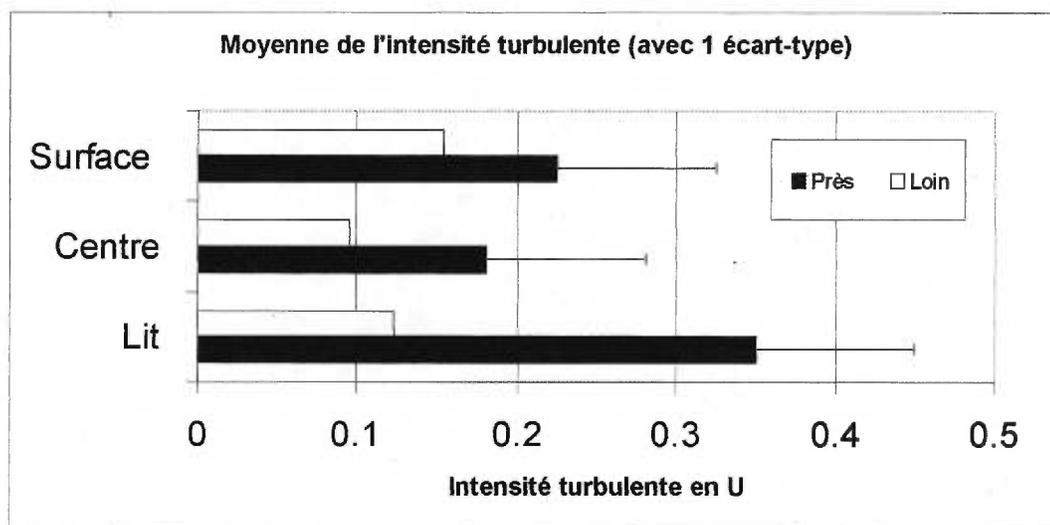


Figure 3.26 Moyenne de l'intensité turbulente selon la distance de la structure et de la position dans la tranche d'eau

	<i>Lit</i>	<i>Centre</i>	<i>Surface</i>
Près-Loïn	2.39*	3.13*	1.82

A.

Près			
Position	<i>Lit</i>	<i>Centre</i>	<i>Surface</i>
<i>Lit</i>	0.00	1.74	1.24
<i>Centre</i>		0.00	-0.95
<i>Surface</i>			0.00

B.

Loïn			
Position	<i>Lit</i>	<i>Centre</i>	<i>Surface</i>
<i>Lit</i>	0.00	2.66*	-2.23*
<i>Centre</i>		0.00	-5.11*
<i>Surface</i>			0.00

C.

* significatif à 0,05

Tableau 3.6 Valeur des test-t pour les comparaisons des valeurs moyennes d'intensité turbulente selon la position par rapport aux structures (A= Toute position par rapport à la distance, B= Position Près par rapport à la hauteur au dessus du lit et C= Position Loïn par rapport à la hauteur au-dessus du lit).

Le Tableau 3.6 présente les résultats d'un test-t et indique si les valeurs moyennes d'intensité turbulente sont différentes selon les positions. La première partie du tableau montre les différences dans les positions dans la tranche d'eau (lit, centre et surface) par rapport à la structure (près ou loïn). Ces résultats indiquent que l'intensité turbulente au lit et au centre de la tranche d'eau est significativement différente selon la distance à la structure. Ce résultat était attendu après l'analyse des vitesses longitudinales qui sont plus élevées dans le centre du chenal de même que les valeurs d'intensité turbulente. Pour la surface, il n'y a pas de différence entre les moyennes.

Le Tableau 3.6 B est une matrice de valeurs de test-t. Les résultats montrent les différences entre les moyennes entre les positions dans la tranche d'eau. La matrice est divisée en deux, soit selon la distance à la structure (près ou loïn). La matrice montre qu'il n'y a pas de différence significative pour n'importe quelle position dans la tranche d'eau près de la structure. En effet, les cartes hydrauliques ont montré que les valeurs d'intensité turbulente près des structure étaient semblables dans la tranche

d'eau. Ceci pourrait venir confirmer le rôle des structures dans l'établissement d'une hydraulique particulière marquée par une augmentation de la turbulence près des structures.

Pour les valeurs loin des structures, la matrice montre qu'il y a des différences significatives entre : le lit et le centre, le lit et la surface, et le centre et la surface. Ces différences dans l'intensité turbulente pourraient être attribuées à la morphologie des coupes transversales. En effet, loin des structures, le lit de la rivière passe d'une grande profondeur (environ 60cm en moyenne) à une faible profondeur (environ 15 cm) sur de faibles distances. De plus, loin des structures, il y a des zones de fortes et de faibles vitesses qui sont aussi sur de faible distance. Ainsi, les conditions seraient propices à l'établissement de valeurs d'intensité turbulente forte.

À la lumière des résultats sur les vitesses moyennes et sur l'intensité turbulente, il semble que les structures jouent un rôle de "tampon" entre l'écoulement et la berge. Les structures vont diriger les vitesses rapides vers le centre du chenal de manière à protéger les berges. Par contre, près des structures, cet effet tampon fait augmenter l'intensité turbulente. Ainsi, l'hydraulique particulière générée près de ce type de structure serait un élément important dans le maintien et le développement des mouilles par ce contact entre les deux écoulements, celui qui est près des structures et celui qui est dirigé vers le centre par les structures.

Chapitre 4

DISCUSSION

Cette recherche avait deux principaux objectifs : 1) d'évaluer les effets à long terme des aménagements sur la morphologie et la sédimentologie de la rivière et ultimement sur la qualité des habitats du poisson et 2) de décrire et quantifier la dynamique de l'écoulement dans une section de rivière aménagée. L'intervention dans les rivières pour améliorer l'habitat physique du poisson est de plus en plus utilisée. Peu d'études à long terme ont été menées pour identifier les causes des changements à long terme dans l'habitat du poisson après une intervention. Nous avons obtenu plusieurs résultats qui permettent de mettre en lumière des facteurs influençant la modification, à long terme de l'habitat du poisson.

Ce chapitre présente une discussion des résultats afin de pouvoir répondre aux questions soulevées depuis plusieurs années sur l'aménagement des rivières pour l'amélioration de l'habitat physique du poisson: Est-ce qu'une restauration peut durer 20 à 25 ans?, Quels sont les impacts sur la morphologie et la sédimentologie de la rivière à long terme? Est-ce que les habitats se maintiennent dans le temps? et dans l'espace? Les populations de poissons réagissent-elles aux modifications de l'habitat? Quel est le comportement de l'hydraulique près des aménagements? Quel est le rôle de l'hydraulique dans la restauration de l'habitat? Autant de questions importantes auxquelles nous avons tenté de répondre dans cette discussion de manière à inter relier les variables du système fluvial qui ont agit sur une période de 33 ans. La discussion sera divisée en trois sections:

- 1) Synthèse des observations
- 2) Habitats et dynamique d'ajustement
- 3) Hydraulique près des structures

4.1 Synthèse des observations

Cette étude a montré que la qualité de l'habitat dans la Lawrence Creek est meilleure qu'en 1963, mais qu'elle régresse depuis 1966. La superficie des mouilles a augmenté de 134% de 1963 à 1966 pour ensuite diminuer de 22 % entre 1966 et 1999. Nous avons estimé que cette diminution de la superficie des mouilles a entraîné la diminution de 42% du nombre de truites mesurant 15 cm et plus depuis 1966 dans les six sections étudiées. La longueur du couvert offert par les structures encore en bon état a aussi fortement diminué passant de 420m en 1966 à 228 m en 1999 soit une diminution de 46%. Aussi, les structures contribuent à la création d'un comportement hydraulique particulier. Les vitesses de l'écoulement les plus rapides sont au centre du chenal et en surface. Les structures contribuent à la formation d'une zone-tampon entre l'écoulement et les berges, ce qui permet d'augmenter l'intensité turbulente près des structures et près du lit.

Les changements dans l'habitat et dans la morphologie de la rivière peuvent être attribués à :

1° La variabilité des processus d'ajustement du cours d'eau qui sont contrôlés par la présence de deux zones de dépôts glaciaires différents. Dans la zone morainique, la plus grande disponibilité des sédiments (plus de sédiments grossiers qui influencent plus la pente de la rivière que les sédiments fins) et leur mise en transport déséquilibre le bilan sédimentaire de la rivière qui doit s'ajuster. La rivière est en situation d'aggradation dans la section d'épandage tandis qu'elle se dégrade dans la section morainique. Nos résultats ont montré que les sédiments de la section morainique, principalement du gravier, se sont retrouvés dans la section d'épandage puisque les superficies de gravier dans cette section ont augmenté changeant ainsi l'habitat physique.

2° Un changement important dans la distribution spatiale des mouilles, qui ont tendance à se fragmenter ceci est probablement dû à un apport considérable de sédiments provenant de l'amont. Les mouilles deviennent ainsi plus nombreuses, plus petites et surtout moins profondes. Cette conséquence sur l'habitat physique est très

importante, puisque Hunt (1971) a montré que la superficie des mouilles était un des facteurs des plus limitants pour les populations de poisson. Il n'est donc pas impossible qu'en 1999, les populations de poisson soient moins élevées qu'en 1966 à cause de la fragmentation et de la diminution des superficies de mouilles.

3° Un maintien de la superficie des mouilles à un niveau beaucoup plus élevé qu'en 1963. Ceci est en grande partie le résultat de l'hydraulique particulière générée par les structures. L'intensité turbulente créée par les structures semble être le facteur responsable de la formation et du maintien des mouilles. De plus, l'intensité turbulente entraînerait une plus grande diversité dans la faune benthique tel que proposé par Bouckeart et Davis (1998).

4.2 Habitat et dynamique d'ajustement

De 1966 à 1999 les changements dans l'habitat physique ne sont pas majeurs. Pour l'ensemble de la section de 600 m, il n'y a eu qu'une très faible dégradation de la qualité de l'habitat comparativement à l'état de 1966. Par contre, dans la section morainique la qualité de l'habitat a fortement diminué depuis 1966 alors que dans la section d'épandage, la qualité de l'habitat est demeurée stable. La qualité de l'habitat en 1999 est de loin supérieure à celle de 1963 (pour toute la section de 600m), mais est-ce suffisant pour affirmer que la restauration a été un succès à long terme?

Les changements observés sont-ils liés à la détérioration des structures? En effet, dans certaines sections, les structures ne sont plus fonctionnelles et à ces endroits, on observe une tendance plus prononcée à la dégradation de l'habitat que dans d'autres portions de la rivière où les structures sont en bon état. Le principal changement associé directement aux structures concerne la disponibilité du couvert. Ce changement est la conséquence de la détérioration physique des structures. En 1966 toutes les structures étaient en bon état et il y avait plus de couvert qu'en 1999. Le couvert est important pour l'habitat physique, puisqu'il était un facteur limitant à la survie et au développement des salmonidés et surtout lors de la période hivernale.

Ainsi, il serait possible de prétendre qu'en 1999, le couvert pourrait être redevenu un facteur limitant pour les salmonidés dans la Lawrence Creek.

Dans beaucoup de suivis sur les aménagements en rivière, les changements dans l'habitat physique sont associés à l'effet des structures. Par contre, ici, d'autres facteurs plus importants sont responsable des changements observés.

Certains indicateurs montrent que la rivière n'est pas vraiment dans un état stable et que des processus intenses d'ajustement s'opèrent. Les structures imposent des contraintes à la rivière. En effet, le type d'aménagement installé sur la Lawrence Creek implique une réduction de la largeur de la rivière sur une période de temps courte. Ainsi, toute la dynamique de l'écoulement a été changée radicalement. Le bilan sédimentaire change aussi puisque les intrants de sédiments changent. Avant l'implantation des structures, il y a un apport de sédiments de l'amont et des berges. Après les travaux, il ne reste plus que l'apport de sédiments par l'amont à cause de la consolidation des berges par les aménagements. La rivière est donc en déséquilibre sédimentaire à cause d'un manque d'intrant. La rivière doit donc créer de nouvelles zones d'érosion pour stabiliser le bilan sédimentaire.

Il est ironique de constater que les changements entre 1963 et 1966 sont exclusivement la conséquence de l'installation de structures tandis qu'entre 1966 et 1999, les aménagements ne contribuent que très peu aux changements dans l'habitat physique. Ceux-ci sont maintenant intégrés dans le processus d'ajustement de la rivière.

La présence de deux sections géomorphologiques différentes est un élément clé dans l'évolution de la rivière. Tous les résultats ont montré des différences entre les deux sections et ceci a des répercussions sur l'habitat dans les deux sections. Dans les deux sections, la rivière évolue différemment. La section morainique est une zone où les contraintes de cisaillement appliquées au lit de la rivière ainsi que sur les berges sont très fortes. Ceci fait en sorte qu'une quantité importante de sédiments est mis en transport dans la rivière. Aussi, la morphologie de cette section a complètement changé, ce qui indique encore une fois une activité très dynamique d'ajustement. Ici, il

est important de se questionner sur les structures installées en fonction du contexte géomorphologique. Est-ce que la technique du déflecteur avec couvert est bien adaptée aux deux sections? Les résultats ont montré que non. La section morainique est trop dynamique et les sédiments trop différents pour que la technique soit adaptée comme c'est le cas dans la section d'épandage où les structures ont maintenu l'habitat physique du poisson.

La pente du lit de la rivière dans la section morainique semble être une des causes les plus importantes des changements observés dans l'habitat physique. La courbe cumulée des élévations a très bien démontré que cette section a subi une érosion importante depuis 1966 lorsque l'on considère le bilan sédimentaire de la rivière. Les sédiments qui sont mis en transport doivent être évacués au même taux d'entrée si la rivière veut garder un état d'équilibre. Ici, ce n'est pas le cas puisque la section en aval a une très nette tendance à l'accumulation depuis 1966. La courbe cumulée des élévations l'a bien démontré de même que l'augmentation importante des superficies de gravier (gravier provenant de la section morainique) dans la section d'épandage. Le fait que la pente soit plus forte dans la section morainique permet l'augmentation de l'approvisionnement en sédiments et l'augmentation des contraintes de cisaillement au lit. Par conséquent, la capacité de transport dans la section morainique est plus forte que dans la section d'épandage, d'où le déséquilibre dans le bilan sédimentaire.

Le lien entre les contraintes de cisaillement et la taille des sédiments joue un rôle important dans le transport des sédiments. Les résultats ont montré que la section morainique avait une contrainte de cisaillement moyenne plus forte que dans la section d'épandage. D'après les courbes de Shields (1931) qui met en relation la taille des sédiments et la contrainte de cisaillement critique (force requise pour mettre en transport la particule), les contraintes de cisaillement dans la section morainique sont assez fortes pour mettre en transport les graviers. En effet, dans cette section, le D_{50} est d'environ 30 mm. Par conséquent, d'après Shields (1931) il faut une contrainte d'environ 21 Nm^{-2} pour mettre en transport les graviers de la section morainique. Pour la section d'épandage, le D_{50} est d'environ 1 mm et la contrainte critique nécessaire est d'environ 0.7 Nm^{-2} . La Figure 4.1 montre les zones de transport et ceux où il n'y a pas

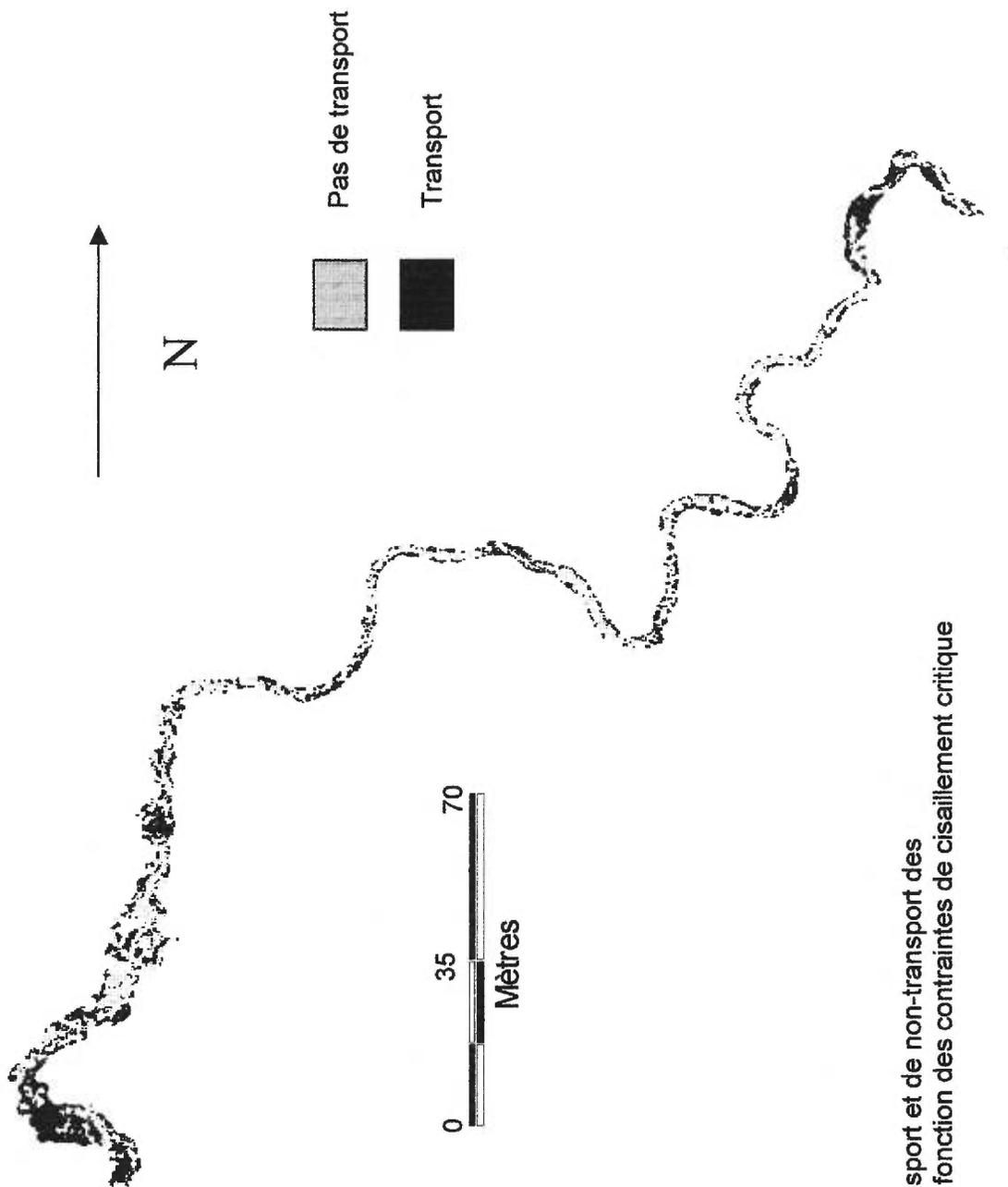


Figure 4.1 Zones de transport et de non-transport des sédiments en fonction des contraintes de cisaillement critique

de transport selon les contraintes critiques, taille des sédiments et la contrainte de cisaillement estimé. Les zones où il y a le plus de transport sont dans la section morainique. Ici, le rôle de la pente est important, puisque les deux sections ont été aménagées de la même façon. Donc, dans la section morainique où la pente est plus forte, la capacité de transport est supérieure à la section d'épandage. Ce résultat est peu surprenant considérant que les changements de morphologie observés dans la section morainique ont été nombreux. Aussi, la courbe cumulée des élévations a montré que cette section n'est pas en équilibre et qu'il y a beaucoup d'érosion. Il y a aussi des zones de transport dans la section d'épandage, mais elles sont associées aux méandres avec de fortes vitesses et où il y a un substrat de gravier. Par contre, dans la section d'épandage, la dominante est au non-transport des particules. Encore une fois, la courbe cumulée des élévations a montré que cette section n'est pas en équilibre et qu'il y a une tendance à l'accumulation.

Ainsi, la rivière est en cours d'ajustement puisque le bilan sédimentaire n'est pas en équilibre. Le lit de la rivière dans la section morainique se dégrade et le lit dans la section d'épandage s'aggrave. Ceci a de nettes conséquences sur l'habitat physique, surtout pour le maintien des mouilles. La distribution spatiale et la forme des mouilles est complètement différente depuis 1966. La fragmentation et la diminution des superficies des mouilles observées dans certaines des sections de la rivière est une des conséquences liées au bilan sédimentaire de la rivière. La fragmentation est le résultat de l'aggradation du lit de la rivière. En 1966, les mouilles étaient plus grandes et plus profondes tandis qu'en 1999, elles sont beaucoup plus petites et moins profondes suite à l'accumulation de sédiments. L'analyse des profils en long ainsi que de la distribution spatiale des mouilles a montré que certaines mouilles avaient migré vers l'amont. Ceci est probablement lié à de nouveaux bris de pente dans le lit de la rivière (qui définit une mouille) qui se forme à la tête des mouilles. En effet, un bris de pente à la tête d'une mouille va permettre au lit de la rivière de s'ajuster. Un bris de pente est en fait un déséquilibre dans le profil local d'une section (à petite échelle).

Ainsi, les sédiments vont s'affaisser et vont être mis en transport dans la rivière afin de rééquilibrer le profil local (Figure 4.2). Le bris de pente se propagera vers l'amont créant

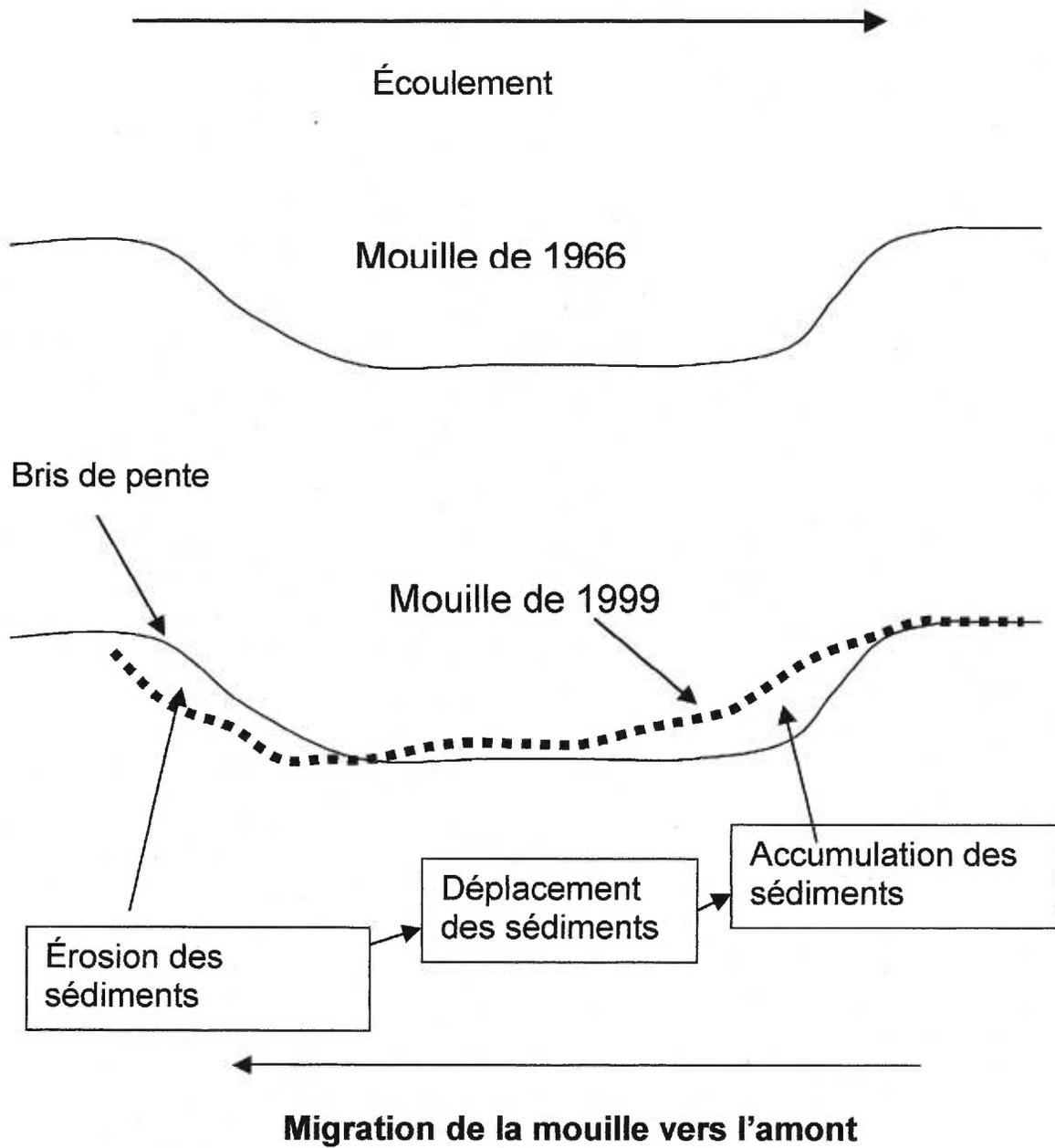


Figure 4.2 Schématisation du déplacement des mouilles vers l'amont

de nouvelles mouilles. C'est probablement pour cette raison que nous avons observé des jonctions (pour former une seule mouille) entre ce qui étaient deux mouilles en 1966. Ce phénomène de bris de pente est très fréquent dans les rivières qui ont été aménagées avec des barrages ou d'autres ouvrages civils (Galay, 1986).

Le mouvement des mouilles vers l'amont pourrait aussi être lié à la présence de végétation sur le lit de la rivière. En effet, le lit de la Lawrence Creek est couvert durant une bonne portion de l'année, d'une mince couche de végétation. Cette végétation pourrait augmenter la cohésion du matériel composant le lit en formant un bris de pente (Galay, 1986).

Les équations de continuité du bilan sédimentaire viennent appuyer certaines des observations faites sur la Lawrence Creek. Schumm (1969) a exposé les changements morphologiques en réponse aux variations du débit solide et liquide. Il utilise l'approche de la géométrie hydraulique (Leopold et Maddock, 1953) afin de comprendre le sens des ajustements d'une rivière suite à un changement dans les débits.

Une des relations de Schumm (1969) s'applique au contexte de la Lawrence Creek puisque le débit solide semble avoir augmenté tandis que le débit liquide est demeuré stable :

$$Q_s^+, Q_w^0 \approx S^+, D_{50}^-, D^-, W$$

où Q_s = débit solide, Q_w = débit liquide, D = profondeur, W = largeur, S = pente, D_{50} = diamètre médian des particules sur le lit, 0 = aucun changement, \pm = respectivement une augmentation ou une diminution.

En effet, dans la Lawrence Creek, la pente du lit n'a pas changé sur la section de 600 m (de 0.0053 en 1966 à 0.0056 en 1999), le D_{50} a probablement diminué (il y a une forte accumulation de sable dans la section d'épandage, malgré l'augmentation des superficie du lit couverte de gravier) et la profondeur a diminué (en 1966 elle était de 0,21m et en 1999 de 0,17m). Par contre, il y eu une tendance à l'augmentation de la

largeur et non à une diminution comme le laisse présager la relation de Schumm (1969). Ceci est probablement lié au fait que les aménagements ont contribué à la stabilisation de la largeur de la rivière. En effet, dans la section d'épandage, les structures empêchent l'expansion de la rivière sur la largeur. Par contre, la détérioration des structures dans la section morainique a permis l'expansion de la rivière sur la largeur, ce qui à long terme a un impact sur la relation développée par Schumm (1969). Aussi, dans les zones où peu d'aménagements ont été installés, la rivière est beaucoup plus large qu'en 1966. Ainsi, la relation de Schumm (1969) n'est pas parfaite pour la Lawrence Creek où les deux sections répondent différemment aux changements dans les débits solides.

Hooke (1997) indique que les réponses de la rivière dépendent également de la stabilité, de la liberté de la rivière de pouvoir s'ajuster ainsi que de la sensibilité de l'environnement. Cela pourrait s'expliquer par ce que Hooke (1997) appelle la liberté de la rivière de s'ajuster. Dans la section morainique, où les structures sont fortement détériorées, rien n'empêche vraiment la rivière à s'ajuster tandis que dans les sections plus aménagées (épandage), les processus d'ajustement sont contraints par le type de structures que l'on a choisi.

La superficie du lit occupé par les mouilles est une des composantes de l'habitat la plus importante sur la Lawrence Creek. Par contre, en considérant la superficie des mouilles comme un facteur limitant, la diminution que nous avons observée dans la superficie du lit couverte par les mouilles devient importante et on pourrait s'attendre à ce que les populations de salmonidés dans la rivière suivent cette tendance. De plus, le fait que le couvert a aussi diminué permet de croire que les populations de truite mouchetée (*Salvelinus fontinalis*) sont plus basses qu'en 1966. L'étroite relation entre l'habitat et les populations de poisson permet d'avoir une bonne idée de l'évolution des populations dans la Lawrence Creek. La relation mathématique suggère qu'il y a eu une diminution de 42% du nombre de truite de 15 cm et plus entre 1966 et 1999 (430 truites en 1966 contre 247 en 1999)

Par contre, il devient important de s'interroger sur la validité du modèle mathématique. Nous avons basé le modèle sur la relation entre la superficie des mouilles, en 1966 et

le nombre de truites. En 1966, la distribution spatiale des mouilles et leur taille étaient différentes de l'état de 1999. Il se pourrait que la relation entre les deux ne soit plus aussi forte et que l'estimation de la biomasse soit biaisée. De plus, la diminution du couvert et de son importance pour la survie hivernale est une autre variable qui pourrait biaiser la relation. Malgré tout, la disponibilité des habitats dans la rivière est encore bonne selon les résultats de l'indicateur biologique calculé.

Les conséquences de l'ajustement de la rivière sont importantes pour l'habitat physique puisqu'à long terme, celui-ci tend à retourner vers un état semblable à celui de 1963, avant les travaux. Est-ce qu'un entretien régulier aurait empêché la rivière de s'ajuster? Probablement que non puisque la section morainique est beaucoup trop dynamique et qu'elle a une influence très grande sur la section aval. Par contre, une approche d'intervention différente entre les deux sections aurait certainement permis une meilleure stabilisation de la section morainique et aurait entraîné une détérioration moins importante pour l'habitat physique du poisson dans cette section.

4.2 Hydraulique près des structures

Le deuxième objectif de l'étude est de caractériser la dynamique de l'écoulement près des structures. Les résultats ont montré que le patron des vitesses moyennes longitudinales, correspond généralement bien aux observations faites dans les méandres (Hooke, 1975 ; Dietrich et al., 1979 ; Bridge et Jarvis, 1982). Les zones de hautes vitesses se concentrent près de la berge concave augmentant les contraintes de cisaillement ce qui entraîne la formation d'une mouille. Il est donc possible de penser que les aménagements de type déflecteur avec couvert (bank cover deflector) permettent d'établir une dynamique de l'écoulement similaire à celle d'un méandre naturel.

Lors de la mise en place des structures, le but était justement d'utiliser la sinuosité d'une rivière. Ainsi, les concepteurs de cette technique ont particulièrement bien réussi, du point de vue hydraulique, à créer une dynamique d'écoulement qui se retrouve naturellement dans les rivières contrairement à d'autres techniques

d'aménagement qui utilisent des théories hydrauliques. Par exemple, les structures de type déflecteur en "V", utilisent le principe de l'augmentation des contraintes de cisaillement au lit par la réduction artificielle du périmètre mouillé d'une section de cours d'eau. Généralement, ce type de situation ne se retrouve pas dans la nature. Les rivières se conforment au principe de la réduction du périmètre mouillé et de l'augmentation des contraintes de cisaillement par l'utilisation de la morphologie (e.g : bancs d'accumulation, gros débris organiques, berges avec des matériaux plus consolidés...) Il est peu fréquent de trouver dans une rivière, une mouille en plein centre du chenal qui soit le fruit d'une concentration ponctuelle de contrainte de cisaillement élevée comme le font les structures de type déflecteur en "V".

Les résultats font ressortir la forte intensité turbulente près des structures et en particulier au lit. Ceci soulève une question : est-ce que l'intensité turbulente pourrait être le processus dominant dans la création et le maintien des mouilles ? Cette idée pourrait être vérifiée à l'aide des résultats obtenus. Même la distribution des vitesses dans les sections étudiées correspond assez bien aux observations faites par différents chercheurs, les contraintes de cisaillement les plus fortes ne semblent pas appliquées, près des structures et au lit comme la littérature sur les méandres le suggère (Hooke, 1975 ; Dietrich et al., 1979 ; Bridge et Jarvis, 1982) . Il semble que les structures agissent comme un tampon entre l'écoulement dominant et l'écoulement sous les structures. Ceci génère une intensité turbulente élevée au lit et directement sous la structure. Plus on s'éloigne de la structure, plus l'intensité turbulente diminue. Ceci permet de croire que l'intensité turbulente serait le processus dominant de création et de maintien des mouilles. En effet, l'intensité turbulente est également associée aux échanges de momentum dans l'écoulement. Donc, plus l'intensité turbulente est élevée, plus il y aura des échanges dans l'écoulement.

4.3 Généralisation de l'étude

Cette étude sur les impacts à long terme de la restauration d'un cours d'eau est une première. À partir de nos résultats, nous pouvons mettre en lumière certaines connaissances sur la restauration des cours d'eau.

Le contexte géomorphologique et la pente du lit de la rivière sont les deux variables qui nous apparaissent comme les plus importantes dans un projet d'aménagement. Nous avons remarqué que la différence de contexte géomorphologique pour la même rivière a eu un impact sur l'habitat physique du poisson. Ainsi, dans des projets de restauration, une analyse détaillée de la géomorphologie régionale des bassins-versants devient un élément capital pour un succès à long terme. Une autre conséquence issue du contexte géomorphologique et de la pente du lit est l'utilisation des structures. Nous avons observé que les structures installées sur la Lawrence Creek n'étaient pas adaptées aux conditions de la section morainique et qu'une structure plus adaptée aux rivières de fortes pentes aurait été mieux adaptée (*K-dam, Wedge-dam,...*).

Il devient difficile de faire une généralisation dans le cas d'une étude comme celle-ci puisque le nombre d'observations est limité à une seule. Malgré le fait que nous ayons eu une quantité importante de données historiques de qualité, certaines conclusions ne peuvent s'appliquer dans le cadre bien précis de la Lawrence Creek. Aussi, la méthodologie utilisée repose en grande partie sur des documents statiques et nous n'avons pas à notre disposition des documents contenant des informations plus dynamiques, notamment sur les régimes hydrologiques, sédimentologiques ou biologiques. Enfin, à cause du manque d'informations et de données plus dynamiques, certains résultats reposent sur des estimations et sur des relations empiriques qui ne sont pas toujours adaptées au contexte de la rivière.

Certaines questions peuvent se poser par rapport à la généralisation d'une telle étude. Est-ce que de grandes fluctuations de débits pourraient changer la dynamique des deux sections de la rivière et avoir un impact important sur les structures et sur l'habitat du poisson? Est-ce que les changements ont été graduels durant les 33

années manquantes ou se sont-ils produits rapidement après l'installation des structures? Ces questions ne pourront probablement jamais obtenir de réponse puisque chaque rivière aménagée évolue dans un contexte différent. Par contre, les connaissances acquises depuis plusieurs années sur les rivières aménagées pourront un jour venir éclairées les interrogations encore nombreuses.

Les implications d'une étude comme celle-ci sont nombreuses. Elle nous permet de réfléchir sur des avenues de recherche possible dans le cadre de la restauration de rivières. Depuis plusieurs années, les études de cas se succèdent sans jamais faire l'intégration des connaissances acquises dans plusieurs milieux, plusieurs types de restauration et plusieurs espèces de poissons. Il devient maintenant important de bâtir un système de gestion des projets de restauration basé sur des modèles d'évolution à long terme des composantes biotiques et abiotiques des rivières afin de bien cibler le type de restauration à effectuer. Enfin, il serait important de documenter encore plus l'hydraulique en présence des structures et plus particulièrement la turbulence qui semble une variable de plus en plus importante dans les liens entre la morphologie des rivières, l'habitat physique et le comportement des poissons.

Chapitre 5

CONCLUSION

Les concepteurs du type de structures étudiées ont réussi à concevoir un aménagement permettant d'intégrer toutes les composantes d'une restauration efficace. Rabeni et Jacobson (1993) prétendent que seule l'intégration de l'hydraulique et de la géomorphologie dans les projets de restauration de l'habitat du poisson pourront mener à des restaurations durables et efficaces. Les déflecteurs avec couvert tels que ceux utilisés dans la Lawrence Creek, intègrent tous les aspects énoncés par Rabeni et Jacobson (1993) puisque ceux-ci tiennent compte du comportement des poissons en leur fournissant de l'abri et contribuent à la création et au maintien de mouilles et à la stabilité des processus d'ajustement des cours d'eau.

Inévitablement, la question se pose : est-ce que le projet de restauration de la Lawrence Creek est un succès à long terme? La réponse est oui, malgré les quelques aspects négatifs. Cette rivière fait partie d'un projet scientifique et bénéficie d'un statut scientifique. Ainsi, aucun travail n'a été effectué sur cette rivière depuis 1966. S'il y avait eu des travaux d'entretien, notre étude n'aurait pu être réalisée. Par contre, un entretien régulier des aménagements auraient permis d'obtenir une durée de vie des aménagements beaucoup plus longue. En 1971, Robert L. Hunt se demandait si des aménagements pouvaient durer jusqu'à 25 ans. Les résultats de la Lawrence Creek tendent vers une réponse positive, mais il ne faut pas oublier que les concepteurs de la restauration ont bien intégré les variables de l'habitat physique ainsi que de la biologie des poissons.

Les résultats de cette étude ont aussi montré l'importance du contexte régional. Sur une distance de 600 m, deux types de dépôts de surface s'y retrouvent et affectent la rivière d'une manière extrêmement différente. Les effets des structures sur les processus d'ajustement de la rivière et donc sur l'habitat physique du poisson varient donc spatialement. Par conséquent, dans les projets de restauration, il devient très important de connaître le contexte régional et d'utiliser ces connaissances pour adapter les techniques en fonction de celui-ci. Brooke (1997) indique que plusieurs études sur des rivières restaurées au Royaume-Uni ont montré qu'un aménagement

était réussi là où il était bien adapté aux conditions locales. Dans la Lawrence Creek, la technique du déflecteur avec couvert n'était pas appropriée dans la section morainique et en 1999, peu de structures sont encore fonctionnelles et la morphologie de la section a complètement changé en 33 ans. Cette étude pourrait aussi servir à établir les bases d'un système de classification des rivières et du type d'aménagement à y implanter semblable à celui de Rosgen et Fittante (1986) ou de Rosgen (1994).

Enfin, les résultats et les interprétations de l'étude auront permis de mettre en lumière certaines variables importantes de l'évolution à long terme d'une rivière qui sont généralement peu étudiées dans les projets de restauration de l'habitat physique du poisson comme le contexte géomorphologique, la dynamique morphologique et sédimentaire de même que l'hydraulique générée près des structures.

RÉFÉRENCES

- ANDRUS C.W, LONG B.A. , FROELICH H.A. (1988) Woody debris and its contribution to pool formation 50 years after logging. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 45 :2080-2086.
- BEECHIE T. J., SIBELY T.H. (1997) Relationships between channel characteristics, woody debris and fish habitat in Northwestern Washington streams. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 126 : 217-229.
- BISSON, P., A., NIELSEN J., L., PALMASON, R., A., GROVE, L., E., (1982) A system of naming habitat types in small streams, with examples of habitat utilization by salmonids during low streamflow. In: N.B. Armantrout, editor. *Symposium on acquisition and utilization of aquatic habitat inventory information*. Special publication of Western Division, American Fisheries Society, Bethesda, Maryland, USA.
- BOUCKAERT F.W. , DAVIS J. (1998) Microflow regimes and the distribution of macroinvertebrates around stream boulders. *Freshwater Biology*, 40 : 77-86.
- BUTLER, D.R. , MALASON, G.P., (1994) Beaver landforms. *Canadian Geographers*, 38, : 76-79.
- BRIDGE J.S., JARVIS, J., (1982) The dynamics of a river bend : a study in flow and sedimentary process. *Sedimentology*, 29(4), 499-541.
- BROOKE, A. (1990) Restoration and enhancement of engineered river channels : some European experiences. *Regulated Rivers : Research and Management*, 5 : 45-56.
- BROOKE, A. (1995a) Challenges and objectives for geomorphology in UK river management. *Earth Surface Processes and Landforms*, 20 : 593-610.
- BROOKE, A. (1997) River dynamics and channel maintenance In : *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*, Ed. Thorne, C.R., Hey, R.D. and Newson, M.D.. John Wiley & Sons. p. 293-307
- BUFFIN-BÉLANGER, T. et ROY, A.G. (1998) Effets of a pebble cluster on the turbulent structure of a depth-limited flow in a gravel-bed river. *Geomorphology*, 25 : 249-267.

- CLIFFORD, N.J., FRENCH, J.R., (1993) Monitoring and modelling turbulent flow : historical and contemporary perspectives. In : *Turbulence Perspectives on Flow and Sediment Transport*, Ed. Clifford N.J., French, J.R. and Hardisty J., John Wiley & Sons, p. 1- 34.
- DIETRICH, W.E., SMITH J.D., DUNNE, T. (1979). Flow and sediment transport in a sand bedded meander. *Journal of Geology*, 87 : 305-315.
- DUFF, D.A., (1982) Historical perspective of stream habitat improvement in the Rocky Mountain area. Wyoming Game and Fish Department, Proceeding of the Rocky Mountain stream habitat management workshop, Laramie, Wyoming.
- DICK, S. (1873) *Flies and fly fishing for white and brown trout, grayling and coarse fish with hints on using the minnow and grasshoper bait* . Harwick, London.
- EHLERS, R. (1956) An evaluation of stream improvement devices constructed eighteen years ago. *California Fish and Game*, 42(3) : 203-217.
- FRISSELL, C., A., NAWA, R., K., (1992) Incidence and causes of physical failure of artificial habitat structures in streams of Western Oregon and Washington. *North Am. J. Fish. Manage.*, 12: 182-197.
- GALAY, V.J. (1986) Causes of river bed degradation Water Resources Research
- GLOVER D. R. (1986) Trout stream rehabilitation in the black hills of South Dakota In :*Fifth stream improvement workshop*, Lock Haven University, Lock Haven Pennsylvania, 7-15.
- HALFORD, F.M. (1903) *An angler's autobiography*. Vinton, London
- HEY R.D. (1992) River mechanics and habitat creation. In : O'Grady K.T., Butterworth A.J.B., Spillett R.P., Domaniewski J.C.J ed. *Fisheries in the 2000*. Institute of Fisheries Management, Nottingham, U.K., 271-285.
- HEY R.D. (1996) Environmentally sensitive river engineering. In : Petts G. and Calow P. ed. *River restoration*, Blackwell Science, Oxford, U.K., 80-105.

- HILDEBRAND, R H., LEMLY A. D, DOLLOF C. A., HARPSTER K L, (1998) Design Considerations for Large Woody Debris Placement in Stream Enhancement Projects. *North American Journal of Fisheries Management*. Vol. 18, No. 1, pp. 161-167.
- HOOKE, J.M., (1997) Styles of Channel Change In : *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*, Ed. Thorne, C.R., Hey, R.D. and Newson, M.D.. John Wiley & Sons. p. 237-268
- HOUSE R., A., BOEHNE, P., L., (1985) Evaluation of instream enhancement structures for salmonid spawning and rearing in a coastal Oregon stream. *North Am. J. Fish. Manage.*, 5 : 283-295.
- HOUSE R., A., BOEHNE, P., L., (1986) Effects of instream enhancement structures on salmonid spawning habitat and population in Tobe Creek, Oregon. *North Am. J. Fish. Manage.*, 6 : 38-46.
- HUNT, R., L., (1969) Effects of habitat alteration on production standing crops and yield of brook trout in Lawrence creek, Wisconsin., In: *Symposium on salmon and trout in streams*. T.G. Northeote (ed.) H.R. MacMillan Lectures in Fisheries, Univ. of British Col., Vancouver, Can. 281-312.
- HUNT, R., L., (1971) Response of a brook trout population to habitat development in Lawrence ceek. *Technical Bulletin Number 48*, Department of Natural Ressources, Madison, Wisconsin.
- HUNT, R., L., (1976) Long-term evaluation of trout habitat development and its relation to improving management-related research. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 105(3) : 361-364
- HUNT, R., L., (1988) A compendium of 45 trout stream habitat development evaluation in Wisconsin during 1953-1985. Wisconsin Department of Natural Ressources, *Technical Bulletin Number 162*, Madison, Wisconsin.
- HUNT, R., L., (1992) Evaluation of trout habitat improvement structures in three high-gradient streams in Wisconsin. Wisconsin Department of Natural Ressources, *Technical Bulletin Number 179*, Madison, Wisconsin.
- HUNT, R., L., (1993) *Trout stream therapy*. University of Wisconsin Press, Madison, Wisconsin.

HUNTER, C., J., (1991) *Better trout habitat: a guide to stream restoration and management*. Island Press, Washington, D.C.

LANE S.N., BIRON P.M. BRADBROOKE K.F., BUTLER J.B., CHANDLER J.H., CROWELL M.D., McLELLAND S.J., RICHARDS K.S., ROY A.G. (1998) Three-dimensional measurement of river channel flow processes using acoustic doppler velocimetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23 : 1247-1267.

LATTA W.C. (1972) The effects of stream improvement upon the anglers catch and standing crop of trout in the pigeon river, Otsego county, Michigan, Michigan Department of natural resources, *Research and development report No. 265*

LEOPOLD, L.B. ET MADDOCK, T. (1953) The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. *United states Geological Survey Professional Paper 252*.

MALLOCH, P.D. (1910) *Salmon, sea-trout, trout and other freshwater fish*. Black, London.

MILNE J.A. et SEAR D.A. (1997) Modelling river channel topography using GIS. *International Journal of Geographical information science*, 11 : (5), 499-519.

MONTGOMERY D.R., BUFFINGTON J.M, SMITH R.D., SCHMIDT K.M., PESS G. (1995) Pool spacing in forest channels. *Water Resources Research*, 31 :1097-1105.

MOTTRAM, J.C. (1928) *Trout fisheries : their care and preservation*. Herbert Jenkins, London.

NAIMAN, R.J., BEECHIE, T.J., BENDA, L.E. (1992) Fundamental elements of ecologically healthy watersheds in Pacific North-west coastal ecoregion. In : *Watersehd management : balacing sustainability and environmental change*. Edited by R.J. Naiman, Springer-Verlag, New-York, N.Y. : 127-188.

NEWBURY R., W., GABOURY, M., N., (1993) *Stream analysis and fish habitat design: a field manual*. Newbury Hydraulics, Ltd., Gibsons, B.C.

- PAICE C., HEY R.D. (1989) Hydraulic control of secondary circulation in meander bends to reduce outer bank erosion. In : *Albertson M.L., Kia R.A. Ed. Design of Hydraulic Structures*, Balkema, Rotterdam, p. 249-254.
- PARASIEWICZ P. (1996) Estimation of physical habitat characteristics using automation and geodesic-based sampling. *Regulated Rivers : Research & Management*, 12 : 575-583
- RABENI C. F. , JACOBSON R. B. (1993) The importance of fluvial hydraulics to fish-habitat restoration in low-gradient alluvial streams. *Freshwater Biology*, 29 : 211-220.
- RALEIGH, R.F. (1982) *Habitat suitability index models : Brook trout*. U.S. Fish and Wildlife Service, FWS/OBS-82/10.24.
- RICHARDS K.S. (1976) *Rivers form and process in alluvial channels*. Methuen, New-York, 358 p.
- ROBERT, A. (1990) Boundary roughness in coarse-grained channels. *Progress in Physical Geography.*, 14 : 42-70.
- ROSGEN D., et FITTANTE, B. (1986) Fish habitat structures : A selection guide using stream classification. In *Fifth trout stream habitat improvement workshop*, ed J. Miller, J. Arway, and R. Carline. p.163-179. Loch Haven, PA.
- ROSGEN, D. (1994) A classification of natural rivers. *Catena*, 22 :169-199.
- ROY, A.G., BIRON, P.M. et DeSerres,B. (1996) On the necessity of applying a rotation to instantaneous velocity measurements in river flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21 : 817-827.
- SCHUMM, S.A., (1969) River metamorphosis. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of Hydraulics Divison*, 95 : 255-273.

- SHETTER, D.S., CLARK, O.H., HAZZARD, A.S. (1949) The effects of deflectors in a section of a Michigan trout stream. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 76: 248-278.
- SIMONS, D.B., ALBERTSON M.L. (1963) Uniform water conveyance channels in alluvial material, *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 128 : 65-107.
- SULLIVAN K. (1986) Hydraulics and fish habitat in relation to channel morphology, *unpublished PhD. Thesis*, The Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland, 410 p.
- TARZWELL, C.M., (1931) Trout stream improvement in Michigan. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 61 : 48-57.
- TARZWELL, C.M., (1937) Experimental evidence on the value of trout stream improvement in Michigan. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 66 : 177-187.
- USDA, Forest service (1952) *Fish stream improvement handbook*
- WALTER, E. (1912) *Die Bewirtschaftung des Forellenbaches : eine Anleitung zur Pflege der Bachforelle in frein Gewasser fur Berufsunnd Sportfisher* (Management of trout stream : an introduction to the care of brown trout in open waters for commercial and sport fishers), J. Neumann, Neudamm, Germany.
- WHITE, R.J., BRYNILDSON, O.M., (1967) Guidelines for management of trout stream habitat in Wisconsin. *Wis. Dep. Nat. Resour. Tech. Bull.* 39, Madison, Wisconsin
- WHITE R.J. (1972) Response of trout populations to habitat changes in Big Roche-A-Cri Creek, Wisconsin. *PhD Thesis, University of Wisconsin*. 296 p.
- WHITE R.J. (1996) Growth and development of North American stream habitat management for fish. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 53 (Suppl. 1): 342-363.

ANNEXES

Section de 600m	1999	1966	1963
Aire totale (m)	2551.70	2416.90	3175.00
Largeur moyenne (m)	4.80	4.20	5.80
Profondeur moyenne (m)	0.17	0.21	0.12
Nombre de mouilles	103.00	123.00	55.00
Nombre de mouilles de plus de 0,60 m	19.00	25.00	9.00
Longueur du couvert (m) estimation pour 1963	228.00	420.00	110.00
% de couvert	8.94	17.38	3.46
Aire des mouilles (m ²)	488.32	624.87	266.74
Aire du substrat de sable (m ²)	1607.80	1678.10	2682.52
Aire du substrat de gravier (m ²)	478.70	363.45	425.20
% de fosse (aire des fosses/aire totale)	19.14	25.85	8.40
% de l'aire occupée par chaque catégorie de substrat			
Sable	63.01	69.43	84.49
Gravier	18.76	15.04	13.39

Annexe A1. Composantes de l'habitat physique pour la section de 600m

Section de 600m	% de changement (1963-1966)	% de changement (1966-1999)	% de changement (1963-1999)
Aire totale (m)	-23.88	5.58	-19.63
Largeur moyenne (m)	-27.59	14.29	-17.24
Profondeur moyenne (m)	71.45	-17.37	41.67
Nombre de mouille	123.64	-16.26	87.27
Nombre de mouilles de plus de 0,60 m	177.78	-24.00	111.11
Longueur du couvert (m) estimation pour 1963	281.82	-45.71	107.27
% de couvert	401.58	-48.58	157.90
Aire des mouilles (m ²)	134.26	-21.85	83.07
Aire du substrat de sable (m ²)	-37.44	-4.19	-40.06
Aire du substrat de gravier (m ²)	-14.52	31.71	12.58
% de fosse (aire des mouilles/aire totale)	207.74	-25.98	127.78
% de l'aire occupée par chaque catégorie de substrat			
Sable	-17.82	-9.25	-25.42
Gravier	12.29	24.75	40.08

Annexe A2 Pourcentage de changement entre les trois années de cartographie pour la section de 600m.

	1999	1966	1963
	<i>Moraine</i>	<i>Moraine</i>	<i>Moraine</i>
Aire totale (m ²)	1147.0	964.0	1081.0
Nombre de mouilles	8.0	49.0	55.0
Aire des mouilles (m ²)	34.2	138.4	17.5
Aire du substrat de sable (m ²)	426.0	516.6	636.0
Aire du substrat de gravier (m ²)	305.0	274.2	342.2
% de mouille	3.0	14.4	1.6
Sable (%)	37.1	53.6	58.8
Gravier (%)	26.6	28.4	31.7

	1999	1966	1963
	<i>Épandage</i>	<i>Épandage</i>	<i>Épandage</i>
Aire totale (m ²)	1404.7	1452.9	2094.0
Nombre de mouilles	95.0	74.0	48.0
Aire des mouilles (m ²)	454.1	486.6	249.2
Aire du substrat de sable (m ²)	1181.8	1161.5	2046.5
Aire du substrat de gravier (m ²)	173.7	89.3	83.0
% de mouille	32.3	33.5	11.9
Sable (%)	84.1	79.9	97.7
Gravier (%)	12.4	6.1	4.0

Annexe B1. Composante de l'habitat pour les deux sections géomorphologiques

	% ch. 63-66 (M)	% ch. 66-99 (M)	% ch. 63-99 (M)
Aire totale (m ²)	-10.8	19.0	6.1
Nombre de mouilles	-10.9	-83.7	-85.5
Aire des mouilles (m ²)	689.6	-75.3	95.1
Aire du substrat de sable (m ²)	-18.8	-17.5	-33.0
Aire du substrat de gravier (m ²)	-19.9	11.2	-10.9
% de mouilles	785.4	-79.2	83.8
Sable (%)	-8.9	-30.7	-36.9
Gravier (%)	-10.2	-6.5	-16.0

	% ch. 63-66 (E)	% ch. 66-99 (E)	% ch. 63-99 (E)
Aire totale (m ²)	-30.6	-3.3	-32.9
Nombre de mouilles	54.2	28.4	97.9
Aire des mouilles (m ²)	95.3	-6.7	82.2
Aire du substrat de sable (m ²)	-43.2	1.8	-42.3
Aire du substrat de gravier (m ²)	7.6	94.4	109.3
% de mouilles	181.4	-3.5	171.7
Sable (%)	-18.2	5.2	-13.9
Gravier (%)	55.1	101.1	212.0

Annexe B2. Pourcentages de changement entre les trois années de cartographie pour les deux sections géomorphologiques. (M=Morainique, E=Épandage)