

Développement et démonstration de techniques
pour la restauration de la qualité du substrat
de fraie des salmonidés - rapport final

Bérubé, F.//Levasseur, M.// Bergeron, N.//Pouliot, M.A.

**VOLET ENVIRONNEMENT
DU FONDS DES PRIORITÉS GOUVERNEMENTALES
EN SCIENCES TECHNOLOGIES ET ENVIRONNEMENT**

Développement et démonstration de techniques pour la
restauration de la qualité du substrat de fraie des salmonidés

Rapport final

Bérubé, F., Levasseur, M., Bergeron, N. et Pouliot, M-A.

Promoteur

Normand Bergeron
Professeur
Institut National de la Recherche Scientifique
Centre Eau, Terre et Environnement
880, chemin Sainte-Foy, bur. 840
Case postale 7500
Sainte-Foy (Québec) G1V 4C7

Téléphone : (418) 654-3703 Télécopieur : (418) 654-2615

15 octobre 2003

**VOLET ENVIRONNEMENT
DU FONDS DES PRIORITÉS GOUVERNEMENTALES
EN SCIENCES TECHNOLOGIES ET ENVIRONNEMENT**

Développement et démonstration de techniques pour la
restauration de la qualité du substrat de fraie des salmonidés

Rapport final

Bérubé, F., Levasseur, M., Bergeron, N. et Pouliot, M-A.

Promoteur

Normand Bergeron
Professeur
Institut National de la Recherche Scientifique
Centre Eau, Terre et Environnement
880, chemin Sainte-Foy, bur. 840
Case postale 7500
Sainte-Foy (Québec) G1V 4C7

Téléphone : (418) 654-3703 Télécopieur : (418) 654-2615

15 octobre 2003

ÉQUIPE DE TRAVAIL

INRS-Eau, Terre et Environnement

Directeur de projet : Normand Bergeron

Chargés de projet : Francis Bérubé
Mylène Levasseur
Marc-André Pouliot

Conseil de bande de Betsiamites

Responsable: Jack Picard

Génivar

Chargé de projet: Frédéric Lévesque

Centre-Eau, Terre & Environnement

© 2003

ISBN: 2-89146-510-5

TABLE DES MATIÈRES

Équipe de travail	ii
Table des matières.....	iii
Liste des tableaux.....	vi
Liste des figures	vii
1.0 Introduction.....	9
1.1 Problématique environnementale	10
1.2 But et objectifs	11
1.3 Contenu du rapport	11
2.0 Revue de littérature des techniques de nettoyage existantes	12
2.1 Réduction à la source de l'apport de sédiments fins.....	13
2.2 Scarification	14
2.3 Riffle sifter	15
2.4 Jet à pression d'un mélange d'air et d'eau (Air-water jet).....	17
2.5 Jet d'eau à pression (High-pressure water jet).....	17
2.6 «Pump washing».....	18
2.7 Curage : action combinée de deux jets d'eau perpendiculaires	18
2.8 «Flushing flow»	19
2.9 Déflecteur-barrière (Baffle gate).....	21
2.10 Trappes à sédiments	22
2.11 Création de sites de frai par augmentation de la pente	23
2.12 Seuils et déflecteurs	23
2.13 Remplacement du gravier de frayères par ajout de graviers nettoyés	26
2.14 Combinaisons de plusieurs techniques	29
3.0 Traîneau déflecteur.....	33
3.1 Description générale	34
3.1.1 Caisson déflecteur.....	34
3.1.2 Traîneau déflecteur	34
3.2 Travaux de laboratoire	35
3.3 Terrain phase A.....	39
3.3.1 But et objectifs	39
3.3.2 Description du prototype de terrain	40
3.3.3 Sites et méthodes.....	41
3.3.4 Résultats de l'analyse granulométrique	41
3.3.5 Conclusions.....	47
3.3.5.1 Efficacité du traîneau déflecteur	47
3.3.5.2 Efficacité des griffes	48
3.3.5.3 Déplacement du traîneau.....	48

3.4 Terrain phase B.....	48
3.4.1 Objectifs.....	48
3.4.2 Description du matériel.....	48
3.4.3 Sites et méthodes.....	49
3.4.4 Résultats.....	50
3.4.4.1 Rivière Sainte-Marguerite, court terme.....	50
3.4.4.2 Rivière Sainte-Marguerite, long terme.....	50
3.4.4.3 Rivière Betsiamites, court terme.....	52
3.4.4.4 Rivière Betsiamites, long terme.....	52
3.4.4.5 Taux de survie.....	53
3.4.5 Conclusion.....	55
3.4.5.1 Persistance du nettoyage et taux de survie.....	55
3.5 Terrain phase C.....	55
3.5.1 Description du matériel.....	55
3.5.2 Objectifs.....	56
3.5.3 Site et méthodes.....	56
3.5.4 Résultats.....	57
4.0 Tapis flottant.....	59
4.1 Description générale.....	60
4.2 Travaux de terrain.....	60
4.2.1 Objectifs.....	60
4.2.2 Site et méthodes.....	60
4.2.3 Résultats.....	62
4.2.4 Conclusion.....	62
5.0 Vortex tube.....	63
5.1 Description générale.....	64
5.2 Travaux de terrain.....	65
5.2.1 Objectif.....	65
5.2.2 Site et méthodes.....	65
5.2.3 Résultats et conclusion.....	66
6.0 Ruban d'entretien.....	68
6.1 Description générale.....	69
6.2 Conclusion.....	69
7.0 Conclusion générale.....	70
8.0 Références.....	72

9.0 Annexes	78
9.1 Annexe 1 : Calcul de la force tractrice de l'écoulement	79
9.2 Annexe 2 : Techniques d'échantillonnages granulométrique	80
9.2.1 Cellule d'isolation du courant	80
9.2.2 Mc Neil	81
9.2.3 Cube	82

Liste des tableaux

Tableau 1. Dimensions des trappes à sédiments.....	31
Tableau 2. Dimensions des seuils.....	31
Tableau 3. Effet de l'angle du déflecteur sur la valeur de la force tractrice maximale	38
Tableau 4. Effet de l'angle du déflecteur sur la valeur maximale de l'intensité turbulente	39
Tableau 5. Effets du déflecteur sur le pourcentage de sédiments inférieurs à 2 mm dans la couche du pavement.	42
Tableau 6. Effets du déflecteur sur le pourcentage de sédiments inférieurs à 2 mm dans la couche du sous-pavement.	42
Tableau 7. Effets du déflecteur sur le pourcentage de sédiments inférieurs à 2 mm dans la couche du pavement. Rivière Sainte-Marguerite.....	50
Tableau 8. Effets du déflecteur sur le pourcentage de sédiments inférieurs à 2 mm dans la couche du sous-pavement. Rivière Sainte-Marguerite	50
Tableau 9. Comparaison granulométrique à long terme entre les zones nettoyées et non-nettoyées. Rivière Sainte-Marguerite	52
Tableau 10. Effets du déflecteur sur le pourcentage de sédiments fins. Rivière Betsiamites.	52
Tableau 11. Comparaison granulométrique à long terme entre les zones nettoyées et non-nettoyées. Rivière Betsiamites.....	53
Tableau 12. Comparaison des taux de survie entre les zones nettoyées et non-nettoyées	54
Tableau 13. Pourcentages de sédiments fins (< 2mm et < 1mm) prélevés dans les zones nettoyées et non nettoyées	57

Liste des figures

Figure 1. Riffle sifter	15
Figure 2. Création de sites de fraie au moyen de barrages	23
Figure 3. Site de fraie artificiel avec déflecteur de pierres en V.....	25
Figure 4. Seuils retenant le gravier ajouté	26
Figure 5. Plan du site du projet de restauration de la rivière Merced, Californie.....	27
Figure 6. Localisation des seuils et trappes à sédiments sur les trois sites à l'étude	30
Figure 7. Schéma de principe du traîneau déflecteur.....	34
Figure 8. Schéma du déflecteur utilisé pour les travaux de laboratoire.....	36
Figure 9. Localisation des points d'échantillonnage par rapport au déflecteur	36
Figure 10. Distribution spatiale de la force tractrice selon l'angle d'inclinaison et la distance du déflecteur.....	37
Figure 11. Distribution spatiale de l'intensité turbulente (RMS) selon l'angle d'inclinaison et la distance du déflecteur.....	38
Figure 12. Photo du prototype de traîneau déflecteur testé sur le terrain	40
Figure 13. Comparaison de la composition granulométrique du site 1 avant et après l'application du déflecteur.....	43
Figure 14. Comparaison de la composition granulométrique du site 2 avant et après l'application du déflecteur.....	44
Figure 15. Comparaison de la composition granulométrique du site 3 avant et après l'application du déflecteur.....	45
Figure 16. Comparaison de la composition granulométrique du site 4 avant et après l'application du déflecteur.....	46
Figure 17. Photo de mise en suspension des sédiments par le traîneau déflecteur	47
Figure 18. Photo des griffes utilisées pour la démobilité du substrat	49

Figure 19. Comparaison des pourcentages de sédiments fins présents dans les cubes au printemps dans la rivière Sainte-Marguerite.....	51
Figure 20. Comparaison des taux de survie entre les zones nettoyées et non-nettoyées pour la rivière Sainte-Marguerite.....	53
Figure 21. Comparaison des taux de survie entre les zones nettoyées et non-nettoyées pour la rivière Betsiamites.	54
Figure 22. Photo du traîneau déflecteur adapté à la récupération des sédiments.	56
Figure 23. Distribution granulométrique des sédiments récupérés par le bac	58
Figure 24. Photo du traîneau déflecteur ayant récupéré des sédiments dans son bac.....	58
Figure 25. Schéma de principe du tapis flottant	60
Figure 26. Séquence de photos montrant les mouvements ondulatoire du tapis	61
Figure 27. Pourcentage de sédiments <2 mm dans les zones nettoyées et non-nettoyées par le tapis flottant	62
Figure 28. Schéma d'une coupe transversale du vortex tube dans le lit de la rivière.....	64
Figure 29. Schéma de la vue en plan du vortex tube placé en rivière.....	65
Figure 30. Deux photos de l'installation du vortex tube sur le site de travail.	66
Figure 31. Pourcentages de sédiments fins (< 2mm) contenus dans les différentes zones.....	67
Figure 32. Schéma de principe du ruban d'entretien.	69
Figure 33. La cellule d'isolation du courant.	80
Figure 34. Schéma de la cellule d'isolation du courant.	81
Figure 35. Échantillonnage du substrat avec un appareil McNeil.	81
Figure 36. Photo d'un cube : armature de métal et sac.....	82
Figure 37. Photo d'un cube installé dans le substrat.....	83
Figure 38. Séquence d'extraction d'un cube du substrat.	83

PARTIE 1

Introduction

1.1 Problématique environnementale

Les processus d'érosion et de sédimentation sont des phénomènes naturels qui font partie intégrante de l'évolution normale d'un cours d'eau. Une rivière est dite «en équilibre» lorsque la capacité du courant à transporter les sédiments est balancée par la charge sédimentaire à transporter. Dans ce cas, on observe qu'il n'y a ni érosion, ni sédimentation excessive dans le cours d'eau.

Les activités humaines ont cependant souvent pour conséquences de créer un déséquilibre entre la capacité de transport d'une rivière et la charge sédimentaire. Plusieurs de ces activités ont un effet néfaste sur l'habitat aquatique des cours d'eau parce qu'elles favorisent la sédimentation de particules fines sur le substrat des rivières (Wood et Armitage, 1997). Par exemple, la construction d'un barrage a pour effet de régulariser le débit d'une rivière, ce qui cause une réduction de la capacité de transport de l'écoulement et la sédimentation de particules fines sur le substrat (Hellawell, 1988; Petts, 1988). D'autres activités humaines, telles l'agriculture (Walling, 1990; Richards *et al.*, 1993), les mines (Davies-Colley *et al.*, 1992), les opérations forestières (Scrivener et Brownlee, 1989) et la construction de routes (Boon, 1988; Marchant, 1989) contribuent aussi au déséquilibre des cours d'eau en injectant de grandes quantités de particules fines qui se déposent sur le substrat.

Il est depuis longtemps reconnu que la présence de particules fines dans le substrat de fraie de salmonidés altère le développement des embryons et restreint les possibilités d'émergence des alevins (Cordone et Kelly, 1961; Witzel et MacCrimmon, 1981; Carling et McCahon, 1987; Chapman, 1988; ASCE, 1992; Wood et Armitage, 1997). Les particules fines nuisent au développement des embryons en bouchant les interstices du substrat, ce qui a pour conséquence de réduire l'écoulement intergranulaire responsable de l'oxygénation des oeufs et des alevins. Les particules fines ont aussi pour effet de bloquer le déplacement des alevins dans le substrat et de réduire considérablement la survie à l'émergence.

La surabondance de sédiments fins a donc pour conséquence de réduire la production de salmonidés, ce qui entraîne nécessairement une diminution de la valeur économique de la pêche récréative de ces espèces.

Cependant, malgré les effets nocifs de la sédimentation fine sur la production de salmonidés, peu de techniques simples sont actuellement disponibles afin d'évacuer ces sédiments du substrat des frayères.

1.2 But et objectifs

Le but du projet consiste à développer un ensemble de techniques simples et pratiques permettant d'évacuer efficacement les sédiments fins de la couche superficielle du substrat afin d'en restaurer la qualité pour la fraie des salmonidés. Plus spécifiquement, le projet a pour objectifs de :

- développer des techniques de nettoyage «hydromotrices», c'est-à-dire qui utilisent l'énergie hydraulique de la rivière pour fonctionner.
- développer les limites et critères d'applicabilité de chacune de ces techniques.
- démontrer l'efficacité de ces techniques pour l'évacuation des sédiments fins de la couche superficielle du substrat des frayères.

Les techniques développées ont pour objectifs de remobiliser les sédiments fins du substrat et de les évacuer de la frayère en agissant sur l'une ou l'autre des deux variables hydrauliques qui régissent le transport de sédiment en rivière, soit la vitesse moyenne de l'écoulement près du lit et l'intensité turbulente.

1.3 Contenu du rapport

Ce rapport final présente l'ensemble des travaux effectués dans le cadre du projet. Le document est divisé en sept parties principales. La première partie contient l'introduction et les objectifs du projet. La deuxième présente une revue de littérature critique des différentes techniques de nettoyages de frayères existantes. La troisième partie décrit l'ensemble des travaux effectués pour le développement du traîneau déflecteur. La quatrième partie est dédiée au tapis flottant. La cinquième partie porte sur les travaux réalisés sur le vortex tube. La sixième partie porte sur le ruban d'entretien et la septième partie conclue le rapport.

PARTIE 2

Revue de littérature des techniques de nettoyage existantes

par Mylène Levasseur

2.1 Réduction à la source de l'apport de sédiments fins

Cette technique est la plus écologique, mais aussi la plus compliquée et la moins plausible autant sur le plan politique, économique que social. Écologiquement parlant, il est légitime de penser à cette méthode, car on sait qu'une rivière qui n'est pas perturbée par un apport supplémentaire anormal de sédiments est en mesure de nettoyer son lit par elle-même dans une certaine période de temps. Par contre, les raisons pour lesquelles certaines rivières possèdent une quantité de sédiments fins au-dessus de la normale est directement reliée à certaines activités anthropiques. Toutes ces activités favorisent l'érosion des sols des bassins-versants et ainsi le transport par ruissellement des sédiments vers les rivières. Il est donc difficile d'entrevoir la solution parfaite, soit l'élimination à la source de ces apports de sédiments. Par contre, il est possible dans certains cas de réduire et/ou limiter ces apports (Avery, 1996 et Boivin, comm. pers., 2000). Par exemple, en Gaspésie, il a été convenu d'apporter quelques modifications à l'exploitation forestière de certains secteurs, entre autres en modifiant les chemins forestiers et en diminuant les superficies et les méthodes de coupes à blanc (La Cascapédia menacée, documentaire vidéo). Toutes ces modifications permettent d'atténuer l'érosion des sols ainsi que le ruissellement de surface dans le but de diminuer l'apport de sédiments fins vers les fonds de vallées et les rivières. Bref, cette méthode bien qu'efficace comporte plusieurs lourdeurs socio-économiques.

Un exemple efficace de diminution à la source d'apports de sédiments fins a été effectuée aux États-Unis vers la fin des années 1980. Un site de mine inactif contribuait à la dégradation des habitats de fraie et de repos (rearing) du saumon chinook et d'une espèce de truite (steelhead trout) par l'apport incessant de sédiments fins dans une section de 55 km de la rivière Bear Valley Creek (Rowe *et al.*, 1989). En 1989, un programme de revégétalisation fût enfin complété dans le but de diminuer ces apports vers la rivière. Les résultats de ces aménagements ont démontré un impact positif sur la réduction du pourcentage de sédiments fins en aval du site réaménagé passant de 50,1% en 1987 à 37,9% en 1989 (Rowe *et al.*, 1989).

Un autre exemple est celui de la rivière South Fork Salmon en Idaho. En 1965, un moratoire a été appliqué concernant les coupes forestières dans cette région. À ce dernier fût associé une régénération naturelle ainsi qu'une réhabilitation du bassin-versant qui ont mené avec le temps à une diminution non-négligeable des quantités de sédiments fins entraînés et emmagasinés dans la rivière. Par exemple, en 1966, le pourcentage de sédiments fins en surface et sous-surface s'élevait à 46% de la superficie de l'aire d'étude et à 48% du volume en 1969. En 1985, le pourcentage de sédiments fins en surface et sous-surface s'élevait à 19,7% de la superficie et à 25,4% du volume (Platts *et al.*, 1989).

Le problème majeur réside dans le fait qu'il n'est pas toujours possible d'agir sur le problème à la source, tant pour des raisons sociales, politiques, qu'économiques. De plus, trop souvent les stocks de poissons diminuent tellement dramatiquement qu'il faut agir rapidement et les gestionnaires de rivière ne peuvent pas toujours attendre aussi longtemps avant que leur rivière se rétablisse. Le compromis consiste donc à diminuer du mieux que l'on peut l'apport de sédiments fins à la source, qu'il soit naturel ou anthropique, tout en agissant de pair avec une technique de nettoyage adéquate afin de rétablir le substrat de fraie le plus rapidement et efficacement possible. Par exemple,

avant toutes utilisations d'une technique de nettoyage quelle qu'elle soit, les intervenants de la FAPAQ tentent à tous coups de corriger ou de limiter les apports de sédiments entre autres en stabilisant des zones importantes et actives en érosion (Boivin, comm.pers., 2000). Pour réaliser leurs travaux, ils utilisent surtout des matériaux disponibles à proximité des sites concernés pour par exemple construire des enrochements légers à l'aide de toiles géotextiles et de « mottes » de végétation relocalisées (Boivin, 1998).

2.2 Scarification

Cette technique consiste à remuer le substrat à l'aide d'un râteau ou bien d'un tracteur muni d'une fourche pour labourer le substrat afin de mettre en suspension les sédiments fins et provoquer ainsi leur transport vers l'aval. Par exemple, Shackle *et al.* (1999) ont utilisé un rotovateur Dowdeswell Powervator 35 d'une largeur de 90cm, tiré par un tracteur Ford 1220 dans le but de nettoyer un éventuel site de fraie pour la truite brune. La vitesse du rotovateur était de 192 rpm et la vitesse du tracteur était très lente afin d'obtenir un effet maximum de labourage. Les résultats ont démontré que l'utilisation de cette méthode ne réduisait pas nécessairement et significativement (écart-type élevé) le pourcentage de sédiments fins présents dans le substrat (Shackle *et al.*, 1999). De plus, seulement deux de leurs cinq sites nettoyés par la technique montraient une amélioration significative (à $P < 0,05$) du taux de survie de l'espèce étudiée.

En 1997, un programme expérimental concernant l'amélioration de l'habitat d'incubation des œufs du « whitefish », affectés par le colmatage du substrat, a été mis sur pied par BC Hydro en Colombie-Britannique (rapport émis par Ric Olmsted de BC Hydro). L'objectif était de réarranger le substrat enchâssé afin d'en déloger les sédiments fins présents dans les interstices des nids et ainsi de conserver de bonnes conditions d'incubation. Une procédure de scarification a été utilisée sur les aires de fraie et d'incubation du whitefish sur la rivière Columbia et les résultats ont démontré l'efficacité de cette méthode. Leur technique consiste à utiliser une excavatrice dont la pelle est munie d'une brosse-râteau. L'opérateur de la machine déplace les graviers du pavement de façon à en faire des piles pour ensuite les replacer à leur localisation initiale (Groves, comm. pers., 2000). Cette technique détruit l'armure du lit tout en augmentant la taille et aussi le nombre d'espaces interstitiels dans le substrat (Groves, 1999). Les résultats ont aussi montré que les sites scarifiés permettaient un meilleur entretien des œufs comparativement aux sites non-scarifiés (d'après des observations de terrain en 1999 et d'après des résultats d'études antérieures en 1997 et 1998 de BC Hydro). Par contre, l'inconvénient majeur de cette technique est qu'il est souvent nécessaire de répéter le traitement tout dépendant des événements et des conditions hydrauliques lors de la période d'incubation. Par exemple, environ cinq mois après la scarification initiale, BC Hydro a observé un fort taux d'infiltration de sédiments fins dans le substrat. Bref, l'armure était reformée et une re-scarification était nécessaire. D'après BC Hydro, il est assez difficile de prévoir combien de scarifications sont requises pour garder propre l'habitat d'incubation d'une espèce en milieu naturel.

De façon générale, la scarification est une technique relativement simple et peu coûteuse. Par contre, elle est intimement reliée aux conditions d'écoulement. Ainsi, la méthode devient complètement inefficace si les vitesses sont trop faibles pour permettre la mise en transport des sédiments fins. De plus, cette méthode est plus ou moins efficace

globalement et à long terme, en ce qu'elle favorise une redéposition du matériel fin dans les sections en aval du site nettoyé et qu'il faut généralement répéter le nettoyage afin de conserver un substrat relativement propre.

2.3 Riffle sifter

Cette méthode utilise l'action combinée d'un jet d'eau pour déloger les sédiments fins et d'une pompe pour aspirer et récolter ces derniers (Shields, 1968). L'appareil est assez complexe. Il s'agit d'un véhicule amphibien qui soutient une structure sur laquelle est installée de petits tuyaux qui pénètrent verticalement le substrat jusqu'à une profondeur de 12 pouces (Figure 1). Ces petits tuyaux sont caractérisés par des ouvertures en fente qui injectent de l'eau à pression dans le substrat. Les sédiments fins sont ainsi expulsés du lit et pompés par l'écran de succion qui prend place entre chacune des paires de tuyaux d'injection. Le mélange d'eau et de sédiments est ensuite expédié sur la berge à une distance d'environ 100 pieds (Mih, 1978). D'après une expérience menée en 1967, sur trois rivières en Alaska, une diminution entre 30% et 65% du contenu en sédiments fins (i.e. 0.4 mm et moins) est notable suite à un nettoyage du gravier à l'aide du riffle sifter (Meehan, 1971).

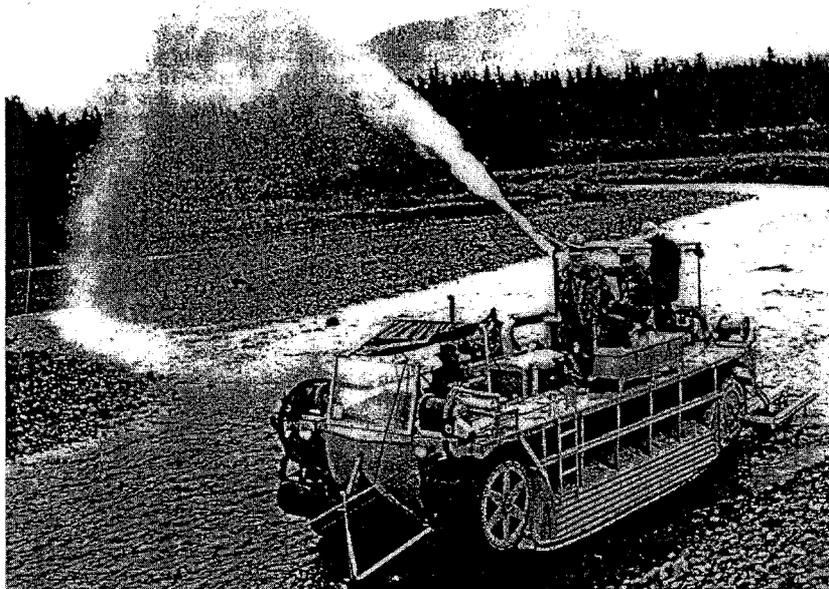


Figure 1. Riffle sifter (Shields, 1968)

Une variante à cet appareil a été développée par Mih et Bailey (1981). Leur objectif était en fait de tester en laboratoire si le jet était bel et bien en mesure de déloger les sédiments fins jusqu'à une profondeur de 30 cm. Ils ont fait varier le diamètre, la vitesse, l'élévation et l'angle du jet ainsi que la vitesse de la machine pour obtenir la combinaison la plus adéquate pour un nettoyage maximal à la profondeur voulue. À partir de ces résultats en laboratoire, ils ont construit un prototype utilisant six jets d'eau expulsée à

vitesse élevée, espacés les uns des autres par 0,3 m, ainsi que des ports de succion reliés à une pompe pour récolter les sédiments fins qui sont expulsés du substrat. De plus, l'appareil est muni d'un « cyclone separator » qui reçoit le mélange d'eau et de sédiments fins pour séparer le solide du liquide par centrifugation. Ainsi, les sédiments fins sont ensuite pompés et expulsés sur la berge à environ 24 m de l'appareil. L'eau est pour sa part réutilisée dans le système, soit par l'un des six jets pour déloger d'autres sédiments fins. Cet aspect est différent du riffle sifter d'origine et constitue sûrement un avantage, car les sédiments fins sont expulsés presque à sec sur la berge et ont ainsi moins de facilité à revenir instantanément vers la rivière par simple ruissellement de surface. Un autre avantage de cet appareil est l'ajout d'une grille de protection juste en-dessous des ports de succion pour éviter que les graviers plus gros que 13 mm entrent dans le système de pompage, évitant ainsi des bris mécaniques assez fréquents. Enfin, cet appareil a été testé sur une petite rivière d'environ 9 m de largeur aux États-Unis et les résultats ont démontré que le gravier a été nettoyé à une profondeur moyenne variant de 15 à 30 cm (Mih et Bailey, 1981). Par contre, les concepteurs de cette machine sont conscients que cet appareil ne peut être utilisé que pour un type spécifique de rivière, soit pour des cours d'eau relativement peu larges.

Il est légitime de se demander si cette technique est trop brutale concernant ses effets sur les micro-organismes des fonds de rivières qui constituent la base même de la chaîne alimentaire en milieu fluvial. D'après une étude menée par Meehan (1971), la technique ne serait pas défavorable à long terme. Après seulement quelques mois ou après un maximum d'un an, les populations de micro-organismes retournent à l'état normal d'avant traitement (Meehan, 1971). Un autre avantage de cette méthode de nettoyage est qu'il est possible de nettoyer assez rapidement de longues sections de rivière avec cet appareil qui, étant amphibien, réduit du fait même les problèmes d'accès à la rivière. De plus, cette technique permet d'enlever les sédiments fins et non pas seulement de les mettre en transport pour les relocaliser ailleurs dans la rivière, soit en aval des sites nettoyés. Par contre, cet avantage peut devenir un inconvénient tout dépendant de la distance mais surtout de l'endroit où sont projetés les sédiments fins, car ces derniers peuvent réintégrer le système par ruissellement lors de pluies intenses ou par le simple gonflement des eaux de la rivière.

Plusieurs problèmes techniques peuvent aussi survenir vu la complexité de l'appareil. Par exemple, certains utilisateurs ont noté que le système d'ancrage devient souvent lâche et que plus souvent qu'autrement les barres de nettoyage ne pénètrent pas de façon adéquate le substrat (Mih, 1978). Enfin, certains utilisateurs du riffle sifter ont remarqué que l'utilisation de l'appareil en milieu naturel semblait affecter les patrons hydrologiques en profondeur. En effet, l'appareil favoriserait l'apport de sédiments fins provenant des profondeurs du substrat vers la surface, créant ainsi une diminution dans la production des œufs (Andrew, 1974). Il a même été noté que la production d'œufs a été meilleure dans une section contrôle que dans une section nettoyée par le riffle sifter. Enfin, cet appareil est très coûteux et complexe. Étant donné sa taille imposante et ses effets négatifs sur la production des œufs, une méthode plus simple et plus commode devrait être envisagée.

2.4 Jet à pression d'un mélange d'air et d'eau (Air-water jet)

L'appareil de nettoyage en question ressemble beaucoup au riffle sifter décrit précédemment à quelques différences près et plus particulièrement par l'utilisation d'un mélange d'air et d'eau et non seulement d'eau concernant le processus d'injection dans le substrat (Mih, 1978). L'appareil se compose de deux rangées de quinze petits tuyaux (diamètre de 2 pouces) installés sur une armature à 17 pouces les uns des autres. Les deux rangées sont, elles aussi, séparées par 17 pouces l'une de l'autre. Ces tuyaux sont reliés à une pompe qui permet d'injecter un mélange d'eau et d'air (environ 90 gallons par minute par tuyau) dans le substrat à une profondeur d'environ 6 pouces (Andrew, 1974). L'appareil est tiré vers l'aval par une « track-mounted Gradall » à une vitesse de 3 pieds par minute. Les sédiments fins sont délogés du substrat par pression pour être mis en transport juste avant la période de frai (i.e. en août). D'après des expériences menées en 1972 et 1973 en chenal artificiel de fraie, environ 60% du matériel plus petit que 2,38 microns a été délogé du substrat pour une profondeur de 10 pouces suite à l'utilisation de l'appareil de nettoyage (Andrew, 1974). De plus, le taux de survie des œufs à l'émergence a par le fait même augmenté. Par contre, la technique est plus ou moins efficace en milieu naturel. Le principal problème réside dans le fait que la présence accrue de blocs empêche les jets d'atteindre les sédiments fins logés en profondeur dans le substrat. De plus, la quantité de sédiments fins est souvent trop importante en milieu naturel pour permettre aux jets de nettoyer entièrement et adéquatement le substrat.

Tout comme la scarification, cette méthode est elle aussi reliée aux conditions d'écoulement. Par exemple, selon Andrew (1974), l'appareil de nettoyage est en mesure d'extirper des sédiments de la taille des sables, mais la vitesse de l'écoulement est souvent insuffisante pour les transporter plus loin vers l'aval. Il y a ainsi redéposition de ces sédiments sur le site même.

2.5 Jet d'eau à pression (High-pressure water jet)

Le principe ressemble au riffle sifter, mais en beaucoup plus simple. Il s'agit d'une « KEW 5203 KD pressure washer » qui pompe l'eau de la rivière à 150 bar à partir d'une lance qui se tient à mains et qui injecte ensuite l'eau pompée avec des jets de 5 et de 1 mm de diamètre (Shackle *et al.*, 1999). L'eau injectée libère ainsi le substrat de sédiments fins en profondeur, soit environ 10 à 15 cm de profondeur sur une colonne d'environ 3 à 5 cm de diamètre.

Shackle *et al.* (1999) ont voulu tester l'efficacité de cette technique de nettoyage en 1) comparant le pourcentage de sédiments fins avant et après l'utilisation de la technique, mais aussi en 2) analysant le taux de survie d'œufs de truites brunes placés dans des nids artificiels (i.e. paniers d'infiltration) pour les sites nettoyés. Les résultats ont démontré que tous les sites nettoyés étaient caractérisés par un plus faible pourcentage de sédiments fins dans le substrat comparativement aux sites non-nettoyés. Par contre, sur cinq sites nettoyés, seulement un site démontrait une amélioration significative (à $P < 0,05$) du taux de survie (i.e. nombre d'alevins vivants) de l'espèce concernée.

2.6 «Pump washing»

À l'aide d'une pompe Pacer, caractérisée par un moteur Briggs and Stratton de 3 Hp, l'eau de la rivière est pompée par une lance construite à partir d'un tube percé en cuivre de 1m de long et de 22mm d'épaisseur (Shackle *et al.*, 1999). L'appareil perturbe le substrat sur un diamètre variant entre 10 et 15 cm et à une profondeur de 2 à 3 cm. Ainsi, l'appareil force un volume d'eau important à se déplacer horizontalement dans le substrat du lit plus qu'en profondeur, favorisant ainsi un soulèvement des sédiments fins vers la surface.

Les résultats d'analyse de Shackle *et al.* (1999) ont démontré ici aussi que tous les sites nettoyés possédaient un plus faible pourcentage de sédiments fins dans le substrat. Par contre, cette méthode semble plus efficace que la précédente, car sur les cinq sites nettoyés, trois d'entre eux ont obtenu des valeurs significatives d'amélioration du taux de survie suite à l'utilisation de la méthode de nettoyage.

2.7 Curage : action combinée de deux jets d'eau perpendiculaires

La technique consiste à pomper l'eau de la rivière à l'aide d'une pompe Kubota portative et ensuite d'injecter à forte pression deux jets d'eau à l'aide de boyaux d'un pouce et demi de diamètre (Boivin, comm. pers., 2000). Le premier jet d'eau est injecté perpendiculairement au lit et sert à brasser le gravier à une profondeur d'environ 50 cm. L'autre jet est injecté parallèlement à l'écoulement, tout près du lit, afin de pousser vers l'aval les sédiments fins mis en suspension par l'action du premier jet. Ainsi, les sédiments se déposent plus loin en aval en une forme de vague de sable dès qu'ils rencontrent une zone d'écoulement faible. Par la suite, les sédiments sont récoltés à la main dans des chaudières placées embouchure vers l'amont, afin de faciliter la cueillette. D'après Jacques Boivin de la FAPAQ (comm. pers., 2000), il est préférable d'exécuter cette technique vers la fin de l'été lorsque les poissons sont assez gros pour éviter de les blesser ou tout simplement de les enterrer par la technique de brassage des sédiments.

La FAPAQ n'utilise pas de méthodes directes d'analyse pour calculer les pourcentages de sédiments fins présents dans le substrat avant et après l'utilisation de leurs techniques de nettoyage. Par contre, suite à une toute action de nettoyage, quelle qu'elle soit, ils installent des boîtes d'incubation, avec du substrat artificiel Astro-turf, dans le but de favoriser la reproduction de l'espèce concernée, ici l'Ombre de Fontaine, et de diminuer le temps de colonisation des sites restaurés (Boivin *et al.*, 1998). Ainsi, lors de l'extirpation de la boîte d'incubation après l'émergence des alevins, il est possible de calculer le taux de survie sachant le nombre d'œufs implantés au départ et le nombre d'œufs non-éclos. Il est même possible de savoir à quel moment lors de l'incubation s'est produit tel ou tel autre phénomène naturel associé à la mortalité en observant le stade de développement atteint par les œufs. Ainsi, toutes méthodes de nettoyage utilisées par la FAPAQ sont indirectement testées à l'aide des taux de survie. Par exemple, si les taux de survie sont médiocres, on laisse tout simplement tomber la méthode, car l'objectif premier de la FAPAQ est d'augmenter les populations de l'Ombre de fontaine et non pas de développer une technique de nettoyage précise (Boivin, comm. pers., 2000). De toutes façons, comme on vient de le voir pour les deux techniques de

nettoyage précédentes, soit le « pump washing » et le jet d'eau à pression, il n'est pas indéniable qu'un plus faible pourcentage de sédiments fins dans le substrat soit associé nécessairement à une amélioration du taux de survie. Ainsi, par les taux de survie, l'efficacité de la méthode est directement testée.

La technique de curage est une méthode simple, peu coûteuse et rapide. Par exemple, dans un cours d'eau de 3 m de large, il est possible de nettoyer 17 m² à l'heure avec deux opérateurs (Boivin, comm. pers., 2000). Par contre, comme c'est le cas pour la majorité des techniques de nettoyage, même si les sédiments fins sont ôtés du système il est souvent nécessaire de répéter les opérations de nettoyage lors de ré-accumulation éventuelle de sédiments fins. D'après Boivin (comm.pers., 2000), on doit nettoyer les rivières dès qu'il y a une légère accumulation de sédiments fins afin de ne pas perdre les effets positifs des nettoyages précédents. Certaines rivières nécessitent des nettoyages à toutes les années et d'autres aux cinq ou dix ans, tout dépendant des apports de sédiments, de la dynamique de la rivière et du transport sédimentaire. Enfin, cette méthode présente plusieurs aspects positifs, mais une question majeure reste encore, est-il envisageable d'utiliser cette méthode dans des rivières considérables, qui sont larges et parfois très profondes?

2.8 «Flushing flow»

Avant tout, il est nécessaire de savoir que cette technique requiert la présence d'un ou de plusieurs ouvrages (i.e. barrage) sur le cours d'eau et que la présence de ces derniers modifie de façon non-négligeable la dynamique de la rivière. Par exemple, une simple régulation d'un réservoir peut faire varier la topographie, la profondeur et les vitesses du chenal, affectant ainsi la géométrie du chenal, le transport des sédiments et les habitats aquatiques. Un exemple typique d'impacts d'un réservoir sur les habitats consiste en une accumulation et déposition de sédiments fins sur le lit, provenant des tributaires en aval du réservoir, causées entre autre par la diminution d'écoulements majeurs et ainsi à la réduction de la capacité de transport de la rivière provoquée par la présence du barrage. Ainsi, en aval du barrage, les sites potentiels de fraie peuvent être affectés par ce phénomène par une présence accrue de sédiments fins présents dans les interstices du substrat. À l'opposé, il est aussi fréquent de noter une diminution des apports de sédiments immédiatement en aval des ouvrages (Kondolf *et al.*, 1996 ; Kondolf et Wilcock, 1996) lorsque les tributaires ne contribuent que faiblement à l'apport de sédiments. En effet, les structures bloquent l'apport de sables et de graviers provenant habituellement de l'amont (Kondolf *et al.*, 1996) et modifient ainsi l'équilibre sédimentaire de la rivière. Bref, la présence d'ouvrages sur une rivière modifie les régimes d'écoulement en produisant une réduction nette du débit annuel (Kondolf *et al.*, 1987). Ainsi, si les événements majeurs qui se produisent en conditions naturelles (i.e. crues) ne sont pas reproduits par un ou des relâchements d'eau, il y aura automatiquement accumulation de sédiments fins dans les interstices du substrat en aval des aménagements (Kondolf *et al.*, 1987).

Afin de contrer ces problèmes, il est nécessaire de faire certaines relâchées périodiques et surtout de bien prévoir l'opération afin d'en bénéficier au maximum. Par exemple, il est possible de profiter de ces relâchées ou tout simplement de les utiliser pour déloger les

sédiments fins accumulés sur des sites de fraie existants et/ou potentiels. Il existe deux méthodes générales pour estimer les flushing flows, soit 1) en assumant que le flushing flow doit imiter le régime naturel d'écoulement, que l'on établie à partir de relevés d'écoulement ou bien 2) en utilisant des observations et /ou des calculs directs provenant de formules d'ingénierie pour connaître ce dont l'écoulement à besoin pour entraîner les sédiments à un site choisi (Kondolf *et al.*, 1987). Dans les calculs de la deuxième méthode, on peut estimer la valeur du flushing flow requis à l'aide d'observations de mobilité du lit par la technique des galets-traceur ou bien par des fonctions d'entraînement du matériel (i.e. force tractrice). D'après une expérience menée par Kondolf *et al.* (1987), il faut être excessivement prudent lors de l'utilisation des calculs de la force tractrice pour spécifier l'écoulement requis pour déloger les sédiments fins, car les résultats ont démontré certaines aberrations que l'auteur associe à la non-uniformité des conditions d'écoulement qui prévalaient dans la rivière à l'étude qui était peu large, très escarpée et caractérisée par la présence de petites cascades formées par de gros blocs.

À l'aide de la technique du flushing flow, il est possible d'agir de trois façons différentes concernant la restauration ou l'amélioration de l'habitat de fraie, soit 1) en enlevant les dépôts superficiels de sédiments fins sur le lit 2) en extirpant en profondeur les sédiments fins des interstices du gravier et 3) en maintenant un « gravel looseness ».

Il est possible de débarrasser le substrat de la couche superficielle de sédiments fins sans pour autant entraîner le gravier (Carling, 1984). Une force de cisaillement (τ) qui entraîne le sable et non le gravier doit être définie à partir de la taille des grains à mettre en transport en tenant compte de la taille médiane des graviers de la couche superficielle du substrat (Milhous et Bradley, 1986). Ainsi, le nettoyage le plus efficace s'effectuera à τ_0 . Enfin, le volume d'eau requis pour l'exercice de nettoyage dépend de la quantité de sédiments fins présents, du taux de transport associé et de la longueur de la section à nettoyer (Wilcock *et al.*, 1995).

Pour extirper les sédiments fins en profondeur, on doit nécessairement avoir recours à un mouvement minimum des graviers du substrat. Le phénomène est relativement simple, car lorsque les graviers sont mis en mouvements, il est évident que les sédiments fins qui étaient emprisonnés entre ces derniers seront eux aussi mis en transport. Ainsi, on doit déterminer une valeur de force de cisaillement critique (τ_c) qui permet l'entraînement des graviers à partir de la taille médiane des graviers du substrat (Milhous, 1990; Wilcock, 1992). Le débit critique qui produit en fait la force de cisaillement critique doit être estimé en fonction de la géométrie du chenal et de la rugosité du lit.

La technique de maintenir un « gravel looseness » est une technique intéressante mais des plus complexe. Maintenir une texture lâche des graviers requiert des mobilisations de graviers nombreuses et périodiques pour extirper les sédiments fins des interstices. Les relâchées sont toujours délicates à effectuer étant donné le nombre imposant d'impacts qu'elles provoquent. Ainsi, d'après Kondolf et Wilcock (1996) il est peut-être préférable de laisser tomber cette technique.

En résumé, il est très difficile de maximiser l'enlèvement des sédiments fins et de minimiser le transport du gravier. La meilleure solution est d'obtenir un écoulement qui

produit suffisamment la mobilisation des graviers pour affaiblir la structure de la matrice et ainsi exposer les sédiments fins au transport. L'écoulement doit produire un ratio de transport du sable au gravier suffisamment large pour permettre un enlèvement net des sables. L'enlèvement de sédiments fins dans la sous-surface requiert le transport de gravier à un taux approchant celui du sable. Ainsi, l'enlèvement efficace des sédiments fins est restreint à une très faible étendue de valeurs du débit si on veut éviter une trop grande perte de gravier, car l'extirpation du sable augmente avec le débit tout comme le taux de perte de gravier.

Enfin, il existe toujours des risques à utiliser le flushing flow comme technique de nettoyage, car le contrôle n'est pas absolu. Par exemple, pour éviter d'éroder les nids lors d'écoulements importants et par le fait même de perturber l'incubation des embryons, il est préférable de s'abstenir d'effectuer un flushing flow lors des périodes d'incubation ou sinon d'effectuer adéquatement les calculs afin d'être certain que le substrat ne sera pas érodé à une profondeur excessive ou correspondant à la localisation des chambres à œufs. Un autre exemple concerne l'effet éventuellement négatif du flushing flow sur les habitats de frayères. Si le transport de sédiments lors d'un flushing flow excède l'apport de sédiments provenant de l'amont (comme c'est souvent le cas sur les sections de rivière en aval d'un ouvrage), il est clair que la superficie des sites de fraie en sera ainsi diminuée. Bref, il faut minimiser la perte excessive de sédiments en diminuant le taux de transport de cette grosseur de graviers. Il est parfois inévitable de perdre du gravier lors d'un flushing flow et pour remédier à cette situation on peut entre autre inciter l'érosion locale des berges lorsqu'elles contiennent du gravier de taille appropriée ou bien remplacer le gravier par du gravier artificiel. Bref, l'important est de préserver les nids ainsi que les sites de fraie existants.

Étant donné que les flushing flow produisent une grande variété de changements physiques et que les liens entre l'hydraulique, le transport sédimentaire et les réponses écologiques sont très complexes et influencés par une grande variété de facteurs, il est toujours délicat d'utiliser le flushing flow comme outil ou méthode de nettoyage. En plus d'être complexe, l'opération est souvent coûteuse et ne peut pas toujours être effectuée lorsque nécessaire. Tout dépend de la période de l'année concernée et surtout de la quantité d'eau emmagasinée et requise pour effectuer les relâchées.

2.9 Déflecteur-barrière (Baffle gate)

Le principe de cette technique est relativement simple. Une plaque de bois ou en un autre matériau est déposée sur l'eau avec un certain angle avec le lit, provoquant ainsi une concentration de l'écoulement de façon à ce que les vitesses augmentent en aval proximal du déflecteur (Mih, 1978). Ainsi, le substrat devient mobile et les sédiments fins sont délogés des interstices pour ensuite être mis en transport par l'écoulement ambiant. Cette méthode est assez limitée due à la complexité des rivières en milieu naturel. Les difficultés reliées à la manipulation et à l'utilisation de cette méthode sont nombreuses, en particulier dues à la taille imposante nécessaire du déflecteur et au système de forces requis pour retenir et déplacer cette structure sur la rivière lors des opérations de nettoyage (Mih, 1978). De plus, comme pour plusieurs autres méthodes, il est nécessaire de répéter le nettoyage lors de l'accumulation éventuelle de d'autres sédiments fins.

2.10 Trappes à sédiments

Il existe plusieurs types de trappes à sédiments et il s'agit d'une méthode très répandue, par exemple l'état du Michigan entretient 166 trappes sur 112 rivières (Ylkanen, 1993). En général, le principe est simple, il s'agit de creuser à l'aide d'une pelle mécanique une dépression d'une profondeur de deux à trois fois la largeur de la rivière juste en amont d'un site de fraie. Ainsi, lorsque l'écoulement atteint ce bassin, les vitesses diminuent permettant par conséquent aux sables transportés en suspension et en charge de fond de se déposer au fond de cette dépression (Hermansen et Krog, 1985). Tout dépendant des caractéristiques du bassin-versant et de la rivière, il est parfois même possible que les silts et les argiles se déposent eux aussi (Avery, 1996). Lorsque l'écoulement ressort de la trappe, il possède plus d'énergie et il est ainsi en mesure d'extirper d'autres sédiments fins aux sections localisées en aval de la trappe. C'est pour cette raison qu'il est assez fréquent de construire une succession de trappes, pour optimiser le nettoyage sur une longue section de rivière.

Une trappe de 48,7m X 7,6m X 1,2m a été construite sur une rivière au Michigan au début des années 1980 (Hansen *et al.*, 1982). D'après les résultats, 86% des sables et 10% des sédiments plus fins ont été récoltés par cet aménagement (Hutchinson et Taylor, 1988). Plusieurs autres trappes ont été construites par la FAPAQ sur de petites rivières des réserves fauniques de Portneuf et des Laurentides au Québec avec un succès semblable (Boivin, comm.pers., 2000).

Cette méthode efficace détient aussi quelques inconvénients. Tout d'abord, c'est une méthode temporaire, car il est primordial d'extirper les sédiments fins déposés dans les trappes au moins une fois par année ou plus tout dépendant des caractéristiques de la rivière (i.e. débit, quantité de sédiments, transport) (Hermansen et Krog, 1985). D'après Boivin (comm. pers., 2000), il est possible d'optimiser la construction de ce type de structure afin d'augmenter ses capacités d'entreposage. Il s'agit tout simplement de construire des trappes beaucoup plus longues que larges, ce qui favorise un remplissage de la dépression beaucoup plus graduel et moins rapide. Enfin, il faut aussi penser à tout l'outillage nécessaire pour creuser et nettoyer les trappes. Tout dépendant de l'ampleur de la rivière, l'appareil utilisé est souvent imposant (ex. : pelle mécanique). En pratique, la présence de trappes à sédiments améliore la morphologie du chenal de la rivière en aval (i.e. diminution de la quantité de sable en charge de fond, augmentation en graviers et aussi, plus grande diversité des vitesses d'écoulement et des profondeurs) (Avery, 1996). Par contre, il est aussi fréquent que l'enlèvement des sédiments en charge de fond à l'aide des trappes peut provoquer un déséquilibre sédimentaire à un point tel que de l'incision (encaissement du lit) ou de l'érosion excessive peu en résulter d'avantage en aval. Dans ce sens, la méthode n'est pas toujours adéquate, par exemple les lits de rivière qui ont de la facilité à s'éroder peuvent s'éroder excessivement lorsque des bassins sont creusés. Il faut ainsi être prudent, car l'avantage de la méthode devient vite un inconvénient.

2.11 Création de sites de fraie par augmentation de la pente

La technique est relativement intéressante, car il s'agit de choisir un site caractérisé préalablement par une petite surélévation suivie d'une dépression qu'elles soient naturelles ou anthropiques. Par exemple, à partir d'un ancien barrage de castors abandonné, la FAPAQ a construit un barrage-déversoir à cet endroit et a recouvert le lit, en amont du déversoir, d'une toile géotextile. Par la suite, ils ont recouvert la toile de substrat assez grossier sur une distance d'environ quelques mètres. De cette façon, la pente de cette section de rivière est augmentée sur une distance considérable, permettant ainsi un nettoyage non-négligeable des graviers dans la zone aménagée (i.e. en aval du déversoir) dû à une augmentation des vitesses. Suite à cet aménagement, le site a été utilisé comme site de fraie par l'espèce sauvage présente, soit l'Omble de fontaine (Boivin, comm. pers., 2000).

Hermensen et Krog (1985) ont soumis une idée semblable. Ils proposaient l'utilisation de barrages existants pour construire des lits de fraie potentiellement utilisables. À ces endroits, ils proposaient de créer de fortes pentes à l'aide d'ajout de graviers pour augmenter les vitesses et créer ainsi des sites de fraie propres et exempts de sédiments fins (Figure 2).

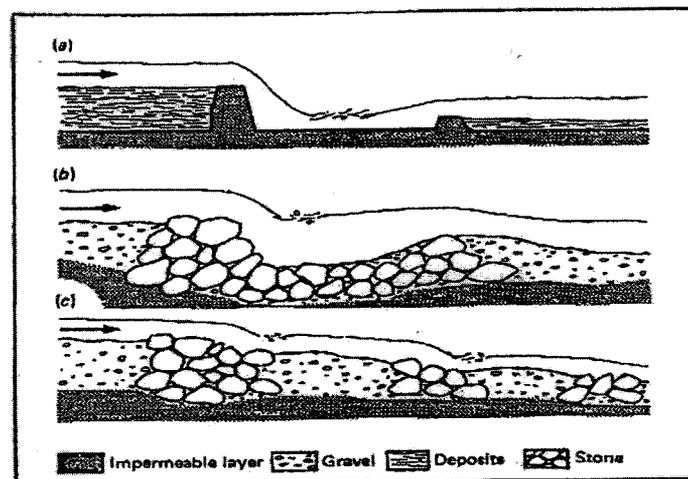


Figure 2. Création de sites de fraie au moyen de barrages (Hermensen et Krog, 1985).

2.12 Seuils et déflecteurs

La technique de seuils consiste tout simplement à construire des barrières de gros blocs perpendiculairement à l'écoulement sur les bancs d'accumulation qui sont constitués de graviers propres et sur lesquels s'écoule l'eau lors de périodes de hauts niveaux (White, 1942). Ainsi, lorsque le niveau d'eau de la rivière augmente, une partie de l'écoulement passe par-dessus le mur de graviers et favorise ainsi, juste en amont de la structure, un site de fraie de conditions hydrauliques exceptionnelles et de graviers propres du à l'accélération du courant à cet endroit. Des observations de terrain ont prouvé que certains saumons ont frayé juste un peu en amont de la crête de ces ouvrages pendant les

deux années de l'étude (White, 1942). Par contre, il faut utiliser cette méthode avec prudence, en s'assurant que le niveau d'eau sera assez haut durant la fraie et surtout lors de la période d'incubation des œufs, afin que ces derniers ne soient jamais à découverts (i.e. à l'extérieur de la zone mouillée et ainsi avoir de fortes probabilités de geler durant l'hiver ou tout simplement de manquer d'apports en oxygène par une interruption de l'écoulement intergranulaire).

La construction de déflecteurs est une méthode plus répandue que l'est celle des seuils. Il existe plusieurs types de déflecteurs de tailles et de formes très variées. En Oregon, une série de déflecteurs en V, orientés vers l'aval, a été construite dans le but d'améliorer l'habitat de fraie en captant les graviers en charge de fond qui se déplacent vers l'aval lors de crues (Everest *et al.*, 1989). Ainsi, en 1983, 26 déflecteurs ont été construits sur la Fish Creek. Pour ce faire, le pavement est enlevé à des localisations spécifiques et ces dernières sont ensuite délimitées par de gros blocs installés en forme de V. Les déflecteurs sont d'une hauteur de 1 à 1,5 m de haut et d'une longueur approximative de 30m. Enfin, 23 des 26 déflecteurs s'étendent d'une berge à l'autre. D'après quelques observations de terrain, la technique est efficace, car la plupart des déflecteurs ont capté du gravier propice à la fraie à la suite de plusieurs crues subséquentes et ce gravier a même été utilisé comme site de fraie par une espèce de truite, la steelhead trout. Par contre, ce projet possède quelques inconvénients, entre autres il est très dispendieux et il provoque la perte d'habitats d'hiver et d'été pour les truites de 1 ans et plus, car les blocs utilisés pour la construction des déflecteurs ont été prélevés sur des seuils de la rivière, à l'intérieur du périmètre mouillé, qui constituent l'habitat de repos préférentiel de l'espèce étudiée. Comme pour tous aménagements, il faut toujours tenter de prévoir la totalité des effets sur le système en entier pour ne pas, comme ce fût le cas avec ce projet, défavoriser un certain type d'habitat (repos) pour en favoriser un autre (fraie).

Par contre, d'autres projets ont très bien fonctionnés, entre autre celui de Fusilier et Edds (1995) au Kensas qui ont construit un seuil artificiel pour le neosho madtom (*Noturus placidus*). Il s'agit en fait d'un déflecteur en V pointant vers l'amont qui occupe la largeur complète de la rivière et qui est construit à partir de graviers provenant d'une carrière. Il est à noter que le centre de l'ouvrage est moins élevé que le reste pour maintenir la profondeur d'écoulement maximum dans le talweg. Deux ans après la construction de l'ouvrage, le seuil artificiel continuait d'être stable et aussi d'accueillir certaines espèces pour la fraie dont le neosho madtom.

Une autre technique consiste à construire un lit artificiel de fraie ou plutôt de construire un nid, qui correspond aux caractéristiques de conditions parfaites de gravier et d'écoulement déjà connues. Pour se faire, il s'agit d'enlever d'un site choisi (ici, d'une profondeur d'écoulement normale de 6 à 10 pouces) les plus gros blocs et de construire un mini-défecteur en forme de V dans le sens de l'écoulement à l'aide de ces blocs (White, 1942) (Figure 3). Le V doit avoir environ 4 à 5 pieds de large (partie amont du V) et environ 5 pieds de long. Les blocs doivent être enlevés de la zone intérieure du V de façon à obtenir à la fin de l'opération, un gravier relativement lâche et sans gros blocs à cet endroit. À l'apex du V, on doit ancrer un bloc de façon à ce que ce dernier soit inférieur en hauteur aux deux bras du déflecteur (bras d'une hauteur approximative de 6 à 10 pouces chacun). Par conséquent, lorsque l'écoulement atteint l'amont du déflecteur il s'y trouve étranglé par les deux bras et atteint son maximum de vitesse en passant juste

au-dessus de la pierre d'ancrage. Les graviers de la zone interne du V sont ensuite remués à l'aide d'un pic (à une profondeur d'environ 3 à 4 pouces) afin de les libérer de tous sédiments fins et par la suite remplacés au râteau. Enfin, à une distance d'environ 18 pouces en amont de l'apex du déflecteur, on creuse un trou d'environ 18 pouces de diamètre et de 10 pouces de profond que l'on remplit ensuite par du gravier nettoyé. Quatre nids ont été construits à l'aide de cette méthode sur un site habituellement non utilisé par les saumons en période de fraie. D'après des observations de terrain, les quatre nids artificiels ont été utilisés. La femelle saumon avait ouvert le trou en chassant de sa queue les sédiments par-dessus le bloc d'ancrage, déposée ses œufs et recouvert ces derniers à l'aide du substrat propre disponible entre les deux bras du déflecteur. Cette technique est efficace et ne demande pas de matériel extravagant, par contre elle peut devenir très laborieuse (i.e. demande beaucoup de temps et beaucoup de techniciens sur le terrain, ce qui peut devenir coûteux). Par exemple, on doit calculer trois jours complets pour construire douze nids (White, 1942). En travaillant sur une rivière imposante, il devient vite utopique d'utiliser cette méthode. De plus, il est envisageable que ce type de structure disparaisse à la première crue importante. L'entretien ou tout simplement la reconstruction éventuelle de ces mini-défecteurs font en sorte que la technique est considérée comme non durable.

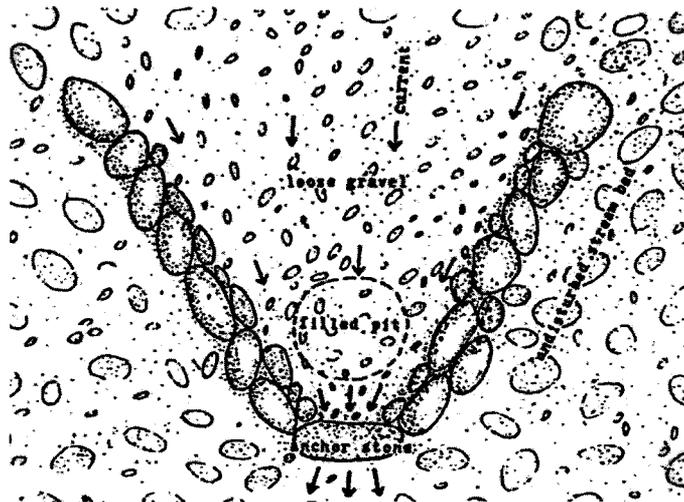


Figure 3. Site de fraie artificiel avec déflecteur de pierres en V (White, 1942).

Certaines tentatives d'amélioration de sites de fraie à l'aide de construction de déflecteurs de courant ont parfois échoué. C'est le cas de la rivière Lerkenfeld au Danemark. En 1980, un déflecteur en V pointant vers l'aval et qui occupait la largeur entière de la rivière a été installé. En 1981, une couche de sable de 10 à 20 cm d'épais recouvrait le lit dans toute la partie aval proximal de ce déflecteur (Hermansen et Krog, 1985). Ainsi, certaines conclusions ont été tirées, soit que 1) les déflecteurs ne fonctionnent pas pour les rivières caractérisées par des pentes plus petites que 1/4000 et 2) les déflecteurs ne

sont pas efficaces dans les rivières caractérisées par un taux excessif de sédiments en charge de fond.

Par conséquent, certaines règles doivent aussi être suivies lors de la construction d'une structure à l'aide de blocs, que ce soit la création d'un seuil ou bien la création d'un déflecteur, il faut que 1) les blocs choisis soient le plus gros possible afin d'éviter leur mise en transport et que 2) les blocs soient le plus anguleux possible pour éviter leur roulement dans les fosses en amont, créées par leur présence. Enfin, pour éviter d'éventuels problèmes, on peut aussi tout simplement câbler les blocs ensemble (Flosi et Reynolds, 1991).

2.13 Remplacement du gravier de frayères par ajout de graviers nettoyés

L'opération consiste à déposer du gravier de taille spécifique sur le lit de la rivière à certains endroits stratégiques, soit les sites de fraie connus et utilisés par le saumon. Il existe plusieurs façons de procéder, entre autre d'excaver dans le lit existant et d'utiliser ensuite ce même gravier nettoyé afin de le déposer sur le lit ou tout simplement d'utiliser du gravier déjà nettoyé provenant d'ailleurs. Quelques variantes à cette méthode existent, entre autre on peut construire des seuils perpendiculairement à l'écoulement et déposer entre chacun d'eux une quantité x de gravier nettoyé (Figure 4) (Hutchinson *et al.*, 1988; Kondolf *et al.*, 1996). En effet, ces seuils servent à retenir les masses de graviers nettoyés lors de crues importantes. En terme d'efficacité, cette méthode a fait ses preuves (Mih, 1978). On peut aussi recouvrir le lit d'une toile géotextile dans le but de prévenir l'enlèvement ou la perte des nouveaux sédiments ajoutés et aussi de permettre le mouvement de l'eau à travers les différentes couches de graviers (Avery, 1996).



Figure 4. Seuils retenant le gravier ajouté (Hutchinson et Taylor, 1988).

Un projet de réhabilitation concernant la reconstruction de sites de fraie du saumon chinook (*Oncorhynchus tshawytscha*) sur la rivière Merced en Californie a été mené en

1990 (Kondolf *et al.*, 1996). Le projet impliquait d'extraire le gravier à une profondeur de 0,6 mètre sur une section de 122 mètres de long et d'y déposer du gravier plus petit, correspondant à la grosseur idéale du substrat de fraie pour cette espèce. Afin de retenir ce gravier importé et nettoyé, six structures de gros blocs ont été installées dans le chenal perpendiculairement à l'écoulement (Figure 5). En 1994, une étude de suivi a été effectuée afin de documenter les conditions du site lui-même mais aussi de la rivière dans son ensemble (amont-aval proximal du site). Le gravier propre déposé sur le lit a été érodé de 0,6 m dans les sections en amont et a été transporté et déposé dans les sections en aval du site pour un écoulement caractérisé par une période de retour de 1,5 ans. Ceci indique que la couche de nouveaux graviers a été emportée en entier vers l'aval. D'après ces observations, il est clair que le design du projet ne tenait pas compte du contexte géomorphologique et hydraulique du site et par le fait même des processus d'érosion, de déposition et de transport de la rivière pour des événements récurrents moyens (i.e. régime moyen d'écoulement, débits modestes). D'après les résultats de l'étude de suivi de Kondolf *et al.* (1996), le gravier importé est mobile pour des écoulements qui se produisent au minimum une fois par année, tandis que le gravier d'avant-projet était stable pour ce type d'événement. D'après Kondolf *et al.* (1996), la simple utilisation des équations de force tractrice aurait pu prédire l'érosion et le transport du gravier importé. Bref, le site artificiel n'est pas stable pour le régime actuel de la rivière et la mobilisation du lit est inévitable, ce qui résultera en une disparition complète (perte) de l'aménagement dans moins de 15 ans.

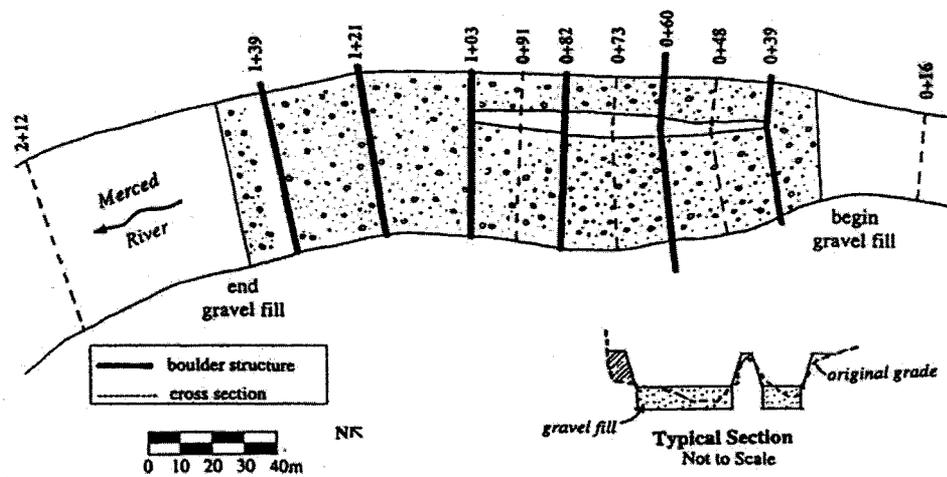


Figure 5. Plan du site du projet de restauration de la rivière Merced, Californie. Les lignes noires représentent les structures de gros blocs (Kondolf *et al.*, 1996).

D'autres projets du genre ont été effectués sur quelques rivières wisconsinienne et ont eux aussi échoués, car le gravier ajouté était rapidement enseveli soit par un apport faible mais constant de sédiments fins transportés en charge de fond ou soit par des apports brefs mais considérables de sédiments fins qui se produisent lors de périodes de forts débits d'écoulement (Avery, 1996).

Après quelques essais erreurs, la FAPAQ a trouvé un moyen de pouvoir déposer du gravier propre sur le lit d'une rivière et par le fait même s'assurer de sa stabilité. Ils ont conclu que l'ajout de gravier ne peut s'effectuer que sur des cours d'eau caractérisés par des pentes variant entre 1.5 et 5 %. En dessous de 1.5%, la pente est trop faible et il y aura assurément déposition de sédiments fins sur le gravier ajouté et au contraire, une pente plus forte que 5 % engendra une perte du gravier ajouté qui ne pourra rester en place (Boivin, 1998). Ainsi, lorsque la pente est adéquate, la FAPAQ ajoute du gravier qui a été nettoyé deux fois, provenant d'un exploitateur d'une carrière connue. La grosseur des graviers ajoutés varie en moyenne entre 1 et 3cm d'axe A et sont ajoutés en une couche de 20 à 30 cm d'épais. Parfois, avant d'ajouter la couche de gravier, les techniciens nettoient le gravier présent ou l'enlève tout simplement à l'aide d'une pelle mécanique. Enfin, il arrive quelquefois qu'ils installent une membrane géotextile entre le gravier naturel et le gravier nettoyé pour éviter que les sédiments fins présents dans le substrat naturel ne remontent dans le gravier nettoyé par écoulements inter-granulaires.

Un autre projet du genre a été effectué sur une rivière de la Suisse, car les interstices des 15 premiers cm du pavement du lit étaient obstrués par une grande quantité de sédiments fins, tandis que ceux de la sous-surface n'étaient obstrués que partiellement. En janvier 1990, 10 m³ de gravier nettoyé d'une taille variant entre 16 et 50mm a été déversé sur la rivière Rhine (Zeh et Dönni, 1994). Le gravier a été distribué à l'aide de pelles de façon aléatoire afin de créer un lit irrégulier d'une épaisseur moyenne de 20 cm, afin d'imiter le plus possible un lit naturel de rivière. L'objectif général de cette méthode était de tester le potentiel de la méthode comme habitat de fraie pour les salmonidés. Le transport de sédiments et les processus d'infiltration des sédiments dans le gravier ainsi que le colmatage éventuel de ce dernier ont été documentés pendant trois ans. Les résultats ont démontré que le gravier ajouté était stable (i.e. pas de transport en charge de fond) même lors de fortes crues. L'absence de transport en charge de fond s'explique entre autre par la présence d'ouvrages hydroélectriques en amont du site étudié qui diminuent de façon non-négligeable l'énergie de la rivière (comme vu précédemment dans la section du flushing flow). Ainsi, les fortes crues ne font que nettoyer le gravier en surface et ne nettoient pas en profondeur. Des mesures de concentration en oxygène dans les interstices ont aussi été effectuées dans le but de nous renseigner indirectement sur la quantité et l'effet de sédiments fins en profondeur dans le substrat. Les résultats ont démontré une diminution en concentration de l'oxygène avec une augmentation des profondeurs, mais aussi dans le temps (i.e. durée de l'étude). Les interstices du gravier nettoyé deviennent donc assez rapidement obstrués avec le temps si aucune action n'est menée pour le garder propre. De plus, comme information supplémentaire, les résultats ont démontré que le degré de colmatage est plus faible en hiver qu'en été. Enfin, sur trois espèces de salmonidés, soit la truite brune, la truite arc-en-ciel et le « grayling », seul le « grayling » a frayé sur le site nettoyé pendant toute la durée de l'étude. En résumé, les auteurs sont conscients que même si le gravier ajouté n'a pas été transporté, la méthode n'est pas la solution ultime, car l'infiltration de sédiments fins dans les interstices du

substrat a lieu éventuellement et les salmonidés n'utilisent pas nécessairement pour autant le site nettoyé. Dans une rivière comme celle à l'étude (i.e. avec barrages) l'énergie est réduite, ce qui entraîne un faible taux de transport en charge de fond qui est ainsi non suffisant pour l'entretien à long terme du site de fraie. En effet, l'infiltration de sédiments fins dans la matrice du substrat aura éventuellement tout de même lieu. La solution miracle serait d'utiliser une technique d'appoint pour nettoyer ponctuellement le substrat ajouté (ex. une fois par année), mais ceci ne constitue pas une méthode durable et économique.

Enfin, la méthode d'ajout de graviers nettoyés possède plusieurs limites. Tout d'abord, le coût associé est relativement élevé et certains problèmes techniques peuvent survenir, par exemple l'accès routier aux sites de fraie qui est souvent difficile pour permettre aux véhicules de venir déposer les importantes quantités de graviers. Il existe un problème beaucoup plus important et il s'agit de l'impact direct de cette méthode sur l'hydraulique et la capacité de transport de la rivière. En ajoutant localement une quantité x de sédiments sur une rivière, on modifie par le fait même l'équilibre entre la quantité de sédiments et la capacité de transport de la rivière en entier. Ce déséquilibre peut changer l'écoulement habituel de la rivière et créer ainsi certains problèmes, par exemples des zones d'érosion ou de déposition de sédiments inhabituelles. Ainsi, en 1985, Hermansen et Krog ont proposé quatre lignes directrices concernant l'amélioration des frayères à partir d'observations sur les rivières des basses-terres danoises en relation avec cette méthode, soit 1) que les frayères doivent être composées de graviers avec une distribution de taille de grains variée, afin d'assurer la stabilité des berges, 2) que la distribution de taille des grains doit s'étendre entre 10 et 55 mm pour assurer une perméabilité satisfaisante et pour permettre aux frayeurs de creuser le nid, 3) que la morphologie du substrat de fraie doit être caractérisée par un faible temps de résidence de l'eau inter-granulaire et 4) que les processus de sédimentation doivent être contrôlés afin de prévenir la déposition excessive de sédiments fins dans et sur le lit.

2.14 Combinaisons de plusieurs techniques

Au tout début des années 1940, plusieurs techniques de nettoyage ont été effectuées, sur la rivière Moser en Nouvelle-Écosse, dans le but de préparer des sites artificiels de fraie pour le saumon atlantique afin de contrer l'effet néfaste des sédiments fins présents dans le substrat de fraie. Une des techniques utilisées est en fait une combinaison de deux techniques, soit l'ajout de déflecteurs à une méthode de scarification (White, 1942). D'abord, les sites artificiels de fraie sont préparés à des endroits où l'espèce a déjà frayé. Pour ce faire, le substrat est ratissé afin que les sédiments fins présents dans les interstices soient soulevés pour être ensuite mis en transport et amenés plus loin en aval par l'écoulement ambiant. Ces sections nettoyées sont ensuite délimitées par l'installation de gros blocs. Les observations ont démontré que les sites nettoyés étaient largement utilisés par l'espèce concernée et plus spécifiquement ceux en amont des gros blocs placés perpendiculaires à l'écoulement où les conditions hydrauliques sont propices à l'incubation des œufs (i.e. accélération de l'écoulement et écoulements inter-granulaires non-négligeable) (White, 1942).

En 1996, Avery a voulu tester l'efficacité d'une seule trappe à sédiments à une combinaison d'une ou de plusieurs trappes et d'un seuil adjacent à ces trappes situé juste en aval. Il a testé l'efficacité de ces deux méthodes en se basant sur l'augmentation ou non de la densité de truites sauvages d'âge 0 sur trois rivières wisconsiniennes. Le premier site (Hey Creek) était caractérisé par la construction d'une seule trappe et le second (Chaffee Creek), de deux trappes consécutives et d'un seuil et le dernier (Waupee Creek), d'une trappe et d'un seuil (Figure 6). Les dimensions des structures sont présentées aux tableaux 1 et 2. Afin de construire les seuils, il s'agit d'ajouter une couche de graviers (6,3 à 25,4 mm) d'une épaisseur de 40 cm entre des crêtes construites à l'aide de pierres des champs variant entre 20 et 40 cm. Les résultats n'ont pas démontré que ni les trappes et ni la combinaison des trappes et des seuils étaient significativement efficaces pour augmenter le recrutement naturel de truites brunes. Les auteurs croient que le manque de résurgences au printemps et/ou le manque d'écoulement provenant des profondeurs du lit seraient à la source du problème. Ces caractéristiques prendraient préséance sur la composition du gravier lors de la sélection des sites de fraie pour ce qui est de la truite brune comme la plupart des autres salmonidés (Avery, 1996). Une autre théorie présentée par les chercheurs correspond au phénomène de « homing » de certains salmonidés, qui consiste à ce que les frayeurs retournent traditionnellement aux mêmes sites de fraie et n'utilisent pas nécessairement de nouveaux sites, même si ces derniers sont potentiellement plus favorables à la reproduction (Avery, 1996). En résumé, ces deux types d'aménagement auraient un meilleur potentiel de succès sur des rivières où les activités du passé auraient servi à augmenter la présence de sédiments fins et ainsi à dégrader de bons sites de fraie ou bien sur des rivières non perturbées mais possédant un nombre insuffisant de sites de fraie naturels adéquats. Les rivières choisies pour cette étude ne constituent pas un échantillon intéressant, car elles sont caractérisées au départ par des sites de fraie adéquats plutôt rares et où les sédiments (sable) en charge de fond sont beaucoup trop excessifs. La présence de dunes sur le lit des rivières en est la preuve.

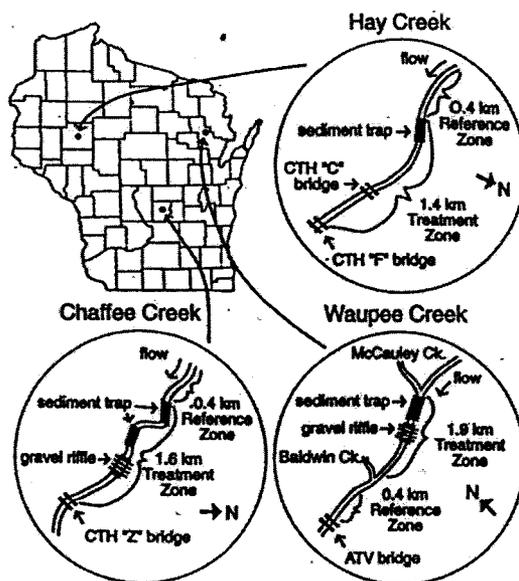


Figure 6. Localisation des seuils et trappes à sédiments sur les trois sites à l'étude (Avery, 1996)

Tableau 1. Dimensions des trappes à sédiments (Avery, 1996).

Creek	Length (m)	Mean width (m)	Mean depth (m)	Storage capacity (m ³)
Hay	79	5.9	0.9	303
Chaffee ^a	67	5.3	1.0	200
Waupee	66	6.7	1.0	282

^a Dimensions are for both halves combined.

Tableau 2. Dimensions des seuils (Avery, 1996).

Creek	Length (m)	Average width (m)	Fieldstone sills		Gravel		Spawning area (m ²)
			Spacing (m)	Base width (m)	Diameter (mm)	Percent by weight ^a	
Chaffee	23.0	4.4	7.6	2.1	≥25.4	0	72
					≥16.0	25	
					≥6.3	73	
					≥2.0	2	
Waupee	30.5	4.5	7.6	2.1	≥55.0	0-0	98
					≥25.4	63-0	
					≥16.0	36-0	
					≥6.3	0-21	
					≥2.0	<1-77	
					<2.0	<1-2	

^a In Waupee Creek, percentages for large and pea gravel are separated by a dash.

L'amélioration physique des habitats de fraie dans le but de rétablir les populations de salmonidés devient de plus en plus populaire. Les projets sont d'échelles très variables, passant du nettoyage et à l'installation de structures mineures à la restructuration complète du lit ou des berges. Plusieurs projets ont échoué (Frissell and Nawa, 1992) soit par un manque de suivi et/ou d'entretien des sites et structures, mais surtout dû à un manque flagrant de compréhension des processus géomorphologiques et hydrauliques des rivières concernées. Avec des projets d'amélioration des habitats, une bonne connaissance des impacts reliés à la restructuration physique d'une rivière est essentielle et nécessaire, car la manipulation de la structure physique d'une rivière peut aussi grandement influencer son écosystème aquatique. Bref, tout est intimement relié (Everest *et al.*, 1989). Par conséquent, il faut porter une attention particulière afin d'imiter le plus possible une rivière naturelle et ne pas créer, comme ce fût le cas avec le projet de la Merced River (Kondolf *et al.*, 1996), une rivière au lit plat avec des distributions de profondeurs et de vitesses trop uniformes. Étant non représentatif de la réalité, la rivière travaillera son lit jusqu'à atteinte d'un équilibre naturel.

Le problème actuel réside dans le fait du manque d'informations, car la plupart des projets d'aménagement d'habitats qui échouent, quels qu'ils soient, ne sont pas expliqués ou disponibles dans la littérature. Par contre, ces échecs pourraient au contraire être des

plus efficaces dans le but de ne pas répéter les mêmes erreurs. Par exemple, Frissell et Nawa (1992) ont évalué les causes de l'échec de 161 structures de restauration d'habitat de poissons pour 15 rivières dans le sud-ouest de l'Oregon et le sud-ouest de Washington. Les résultats ont démontré que la plupart des structures étaient inappropriées et/ou inefficaces dans des rivières caractérisées par d'importantes charges en sédiments, de forts débits d'écoulement et de grandes quantités de matériel provenant de l'érosion des berges. L'échec des ouvrages est tout simplement associé à des changements non-négligeables concernant la morphologie du chenal, qui n'avaient pas été anticipés par les designers des projets. Ces changements sont souvent reliés à des variations de l'hydrologie, du transport en charge de fond et de la stabilité des berges.

Par conséquent, un projet de réhabilitation ou de restauration de frayères doit reposer sur des objectifs concrets et clairs, être bien planifié et être analysé par des expériences scientifiques. Pour ce faire, les conditions géomorphologiques et hydrauliques doivent être considérées lors de la définition des objectifs biologiques et techniques (i.e. description de l'aménagement ou de la méthode de nettoyage) du projet. Il faut toujours tenter de prévoir la totalité des effets sur la rivière en entier que peut engendrer un projet du genre, tant au plan hydraulique, géomorphologique que biologique. De plus, lorsque l'on intervient sur la restauration des frayères, il faut préférer atteindre la qualité optimale avant la quantité (Boivin *et al.*, 1998). Il est préférable de nettoyer que quelques sites potentiels de fraie mais de bien le faire, car le nettoyage excessif et systématique peut s'avérer très coûteux.

Enfin, l'objectif visé est d'abord et avant tout de concevoir une technique de nettoyage qui perturbe le moins possible la dynamique naturelle de la rivière, afin d'éviter le plus possible des effets imprévus et néfastes sur le système en entier. La technique doit être efficace tout en étant le plus viable possible. Par exemple, les coûts associés au nettoyage sont souvent très élevés et il n'est pas rare de perdre les effets bénéfiques d'un nettoyage en une seule crue. En ce sens, il faut penser à nos hivers rigoureux et donc aux couverts de glace, aux embâcles, aux crues printanières et à leurs multiples effets. Il est aussi préférable que la technique soit simple et facile à utiliser afin que les coûts de construction et/ou d'utilisation soient abordables pour les gestionnaires de rivière. L'ensemble de ces conditions concernant la conception d'une nouvelle technique de nettoyage occasionnera un rehaussement de l'habitat physique de fraie des salmonidés et éventuellement une augmentation des populations concernées, qui elles sont intimement liées à des gains socio-économiques importants (ex. : meilleures conditions de pêche sportive).

PARTIE 3

Traîneau déflecteur

3.1 Description générale

Cette technique constitue une variante du caisson déflecteur originalement décrit de la façon suivante dans la demande de subvention.

3.1.1 Caisson déflecteur

Le caisson déflecteur est un lourd caisson sans fond installé sur le substrat et dont les parties amont et aval laissent s'écouler librement l'eau de la rivière. La partie amont du caisson possède la forme d'un entonnoir dont l'ouverture variable permet de contrôler le débit d'eau à l'intérieur du caisson et par le fait même, la vitesse de l'écoulement près du lit. Des éléments rugueux fixés sur les parois intérieures du caisson permettent aussi d'augmenter la turbulence de l'écoulement.

Lors de l'analyse théorique, il a été jugé préférable de modifier le concept original de caisson déflecteur afin de tenir compte de deux facteurs principaux. Premièrement, il est apparu que le concept d'entonnoir menant à un caisson en forme de tunnel créerait une forte charge sur l'appareil qui nécessiterait un lestage très important du caisson afin de le maintenir en place. Deuxièmement, le concept du caisson déflecteur faisait en sorte que l'appareil était difficile à déplacer, donc peu mobile. Le concept de caisson déflecteur a donc été remplacé par celui de traîneau déflecteur qui se décrit de la façon qui suit.

3.1.2 Traîneau déflecteur

Le traîneau déflecteur est un lourd traîneau sur patins composé d'un déflecteur dont la hauteur et l'inclinaison variables permettent d'augmenter la vitesse de l'écoulement près du lit. Le traîneau est tiré de l'aval vers l'amont sur la zone à nettoyer au moyen d'un treuil à main fixé à une tige de métal plantée dans le substrat de la rivière. Des griffes installées sur le traîneau en amont du déflecteur labourent le substrat et augmentent l'efficacité du déflecteur à mettre les sédiments fins en suspension.

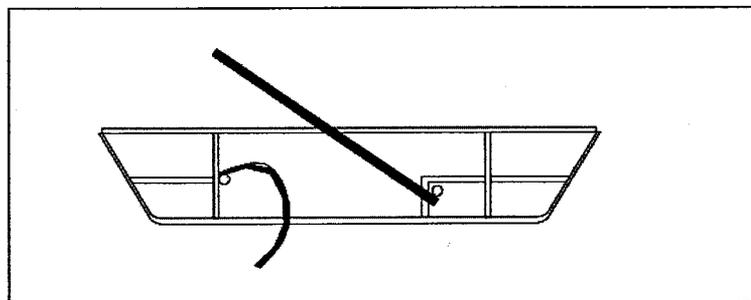


Figure 7. Schéma de principe du traîneau déflecteur.

C'est à partir de ces bases de fonctionnement (figure 7) que le traîneau déflecteur a été conçu. La conception d'un prototype du traîneau a nécessité des travaux de laboratoire. Ces travaux avaient pour but de 1) valider la capacité du déflecteur à augmenter la force

tractrice et l'intensité de la turbulence près du lit et 2) déterminer la configuration de déflecteur permettant de maximiser l'augmentation des variables d'écoulement près du lit ainsi que la superficie du lit sur laquelle cette augmentation s'exerce.

3.2 Travaux de laboratoire

Les travaux ont été effectués au laboratoire d'hydraulique du département de Génie Civil de l'Université Laval. Le canal utilisé mesure 10 m de long par 60 cm de large et 60 cm de haut. Il possède une pente fixe et ne peut pas accueillir de sédiments. En raison de cette dernière caractéristique, seule l'efficacité hydraulique des nouvelles techniques de nettoyage a été évaluée. Trois degrés d'inclinaison du déflecteur, soit 20, 30 et 40 degrés, ont été testés. Pour chacun de ces angles, la base du déflecteur était positionnée à 2 cm au-dessus du lit. La figure 8 présente le montage qui a été utilisé pour les tests. La taille et la forme du déflecteur (i.e. 10 cm de hauteur et 20 cm de largeur) ont été déterminées en fonction des dimensions du canal afin d'éviter qu'un déflecteur trop large interagisse avec les parois et qu'un déflecteur trop haut n'émerge de la surface de l'eau. Les conditions hydrauliques initiales (i.e. avant l'utilisation du déflecteur) étaient les suivantes: profondeur de l'eau : 0.205 m, vitesse moyenne de l'écoulement : 0.40 m/s; force tractrice : 0.13 N/m². Les mesures de vitesse d'écoulement ont été effectuées à l'aide d'un courantomètre acoustique ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) de la compagnie SONTEK. Cet appareil permet de récolter de façon non-intrusive des mesures instantanées tri-dimensionnelles de la vitesse de l'écoulement à une fréquence d'échantillonnage de 25Hz. Les mesures de vitesse ont été effectuées le long d'un plan vertical imaginaire positionné longitudinalement au centre du canal et du déflecteur. La figure 9 montre une vue de profil de la position des points de mesure de vitesse par rapport au déflecteur. Les points d'échantillonnage situés à 1 cm au-dessus du lit ont été utilisés afin de calculer 1) la force tractrice de l'écoulement à partir de la méthode des stress de Reynolds et 2) l'intensité turbulente (voir Annexe 1).

La figure 10 présente les variations longitudinales de la force tractrice pour les différents degrés d'inclinaison du déflecteur testés en laboratoire. Les résultats indiquent que l'utilisation du déflecteur augmente de façon très considérable la force tractrice de l'écoulement. Dans les trois cas, celle-ci augmente rapidement derrière le déflecteur pour atteindre une valeur maximale à une distance d'environ 7 cm de celui-ci. Par la suite, l'effet du déflecteur diminue progressivement vers l'aval et disparaît complètement à une distance d'environ 15 à 20 cm.

Force tractrice

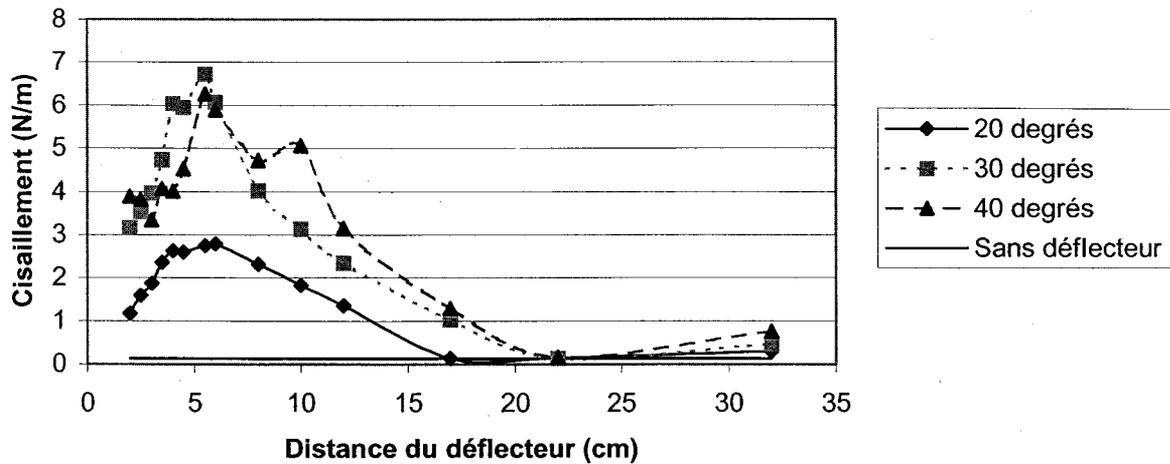


Figure 10. Distribution spatiale de la force tractrice selon l'angle d'inclinaison et la distance du déflecteur.

Les résultats indiquent que le degré d'inclinaison du déflecteur influence de façon marquée la valeur maximale de la force tractrice atteinte ainsi que l'étendue de la zone d'influence du déflecteur. Le tableau 3 montre que pour les angles de 20, 30 et 40 degrés d'inclinaison, la force tractrice maximale atteinte est respectivement 19.9, 48.1 et 44.8 fois plus grande que celle mesurée en l'absence du déflecteur, ce qui représente des pourcentages d'augmentation respectifs de 1893 %, 4707 % et 4379 %. La figure 10 montre que la longueur de la zone d'influence du déflecteur est de 17 cm à 20 degrés et de 22 cm à 30 et 40 degrés.

Intensité turbulente

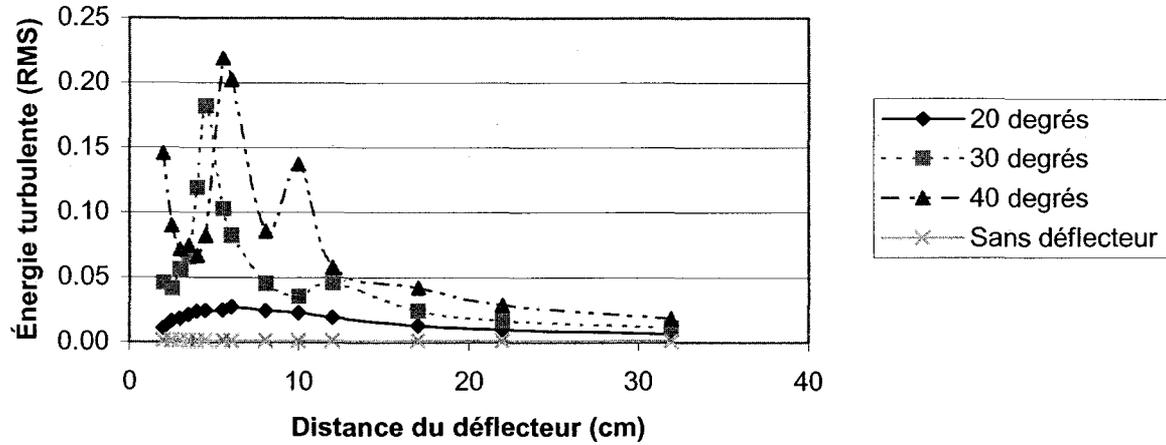


Figure 11. Distribution spatiale de l'intensité turbulente (RMS) selon l'angle d'inclinaison et la distance du déflecteur.

Tableau 3. Effet de l'angle du déflecteur sur la valeur de la force tractrice maximale.

	Valeur maximum	Sans déflecteur	Ratio	% d'augmentation
20 degrés	2.79	0.14	19.9	1893
30 degrés	6.73	0.14	48.1	4707
40 degrés	6.27	0.14	44.8	4379

La figure 11 montre l'effet des différents degrés d'inclinaison du déflecteur sur la distribution longitudinale de l'intensité turbulente (RMS). Le patron observé est généralement similaire à celui décrit pour la force tractrice. Ainsi, l'intensité turbulente atteint une valeur maximale à une distance d'environ 5 à 7 cm du déflecteur pour ensuite diminuer progressivement vers l'aval. Le tableau 4 indique que la valeur d'intensité turbulente maximale atteinte à 20, 30 et 40 degrés d'inclinaison est respectivement 19.3, 128.6 et 157.1 fois supérieure à celle mesurée sans déflecteur. Ces valeurs représentent des augmentations respectives de 1 829 %, 12 757 % et 15 614 %.

Tableau 4. Effet de l'angle du déflecteur sur la valeur maximale de l'intensité turbulente.

	Valeur maximum	Sans déflecteur	Ratio	% d'augmentation
20 degrés	0.027	0.0014	19.3	1829
30 degrés	0.18	0.0014	128.6	12757
40 degrés	0.22	0.0014	157.1	15614

Ces résultats démontrent sans aucune équivoque la capacité du déflecteur à augmenter de façon très considérable les valeurs de force tractrice et d'intensité turbulente près du lit, ce qui laisse entrevoir un très bon potentiel pour le délogement des sédiments fins contenus dans un substrat naturel. Les résultats indiquent également qu'un angle d'inclinaison du déflecteur entre 30 et 40 degrés semble procurer les meilleurs bénéfices, tant du point de vue de l'augmentation de la force tractrice et de l'intensité turbulente que de la longueur de la zone d'influence. Cependant, cette zone d'influence du déflecteur demeure relativement restreinte (environ 20 cm derrière le déflecteur), ce qui justifie le développement d'un concept de déflecteur pouvant être plus facilement transporté à la surface du lit d'une rivière naturelle.

3.3 Terrain phase A

3.3.1 But et objectifs

Au cours de l'automne 2001, des travaux de terrain préliminaires ont été effectués afin de compléter l'évaluation du principe de fonctionnement de la principale technique de nettoyage pressentie: le traîneau déflecteur (figure 12).

L'objectif de ces essais était de 1) déterminer la capacité du déflecteur à soulever au-dessus du lit les sédiments contenus dans le substrat et à les évacuer 2) vérifier l'efficacité des griffes à briser l'imbrication des particules de surface et à labourer en profondeur et 3) évaluer la faisabilité de tirer le traîneau déflecteur de l'aval vers l'amont au moyen d'un treuil à main.

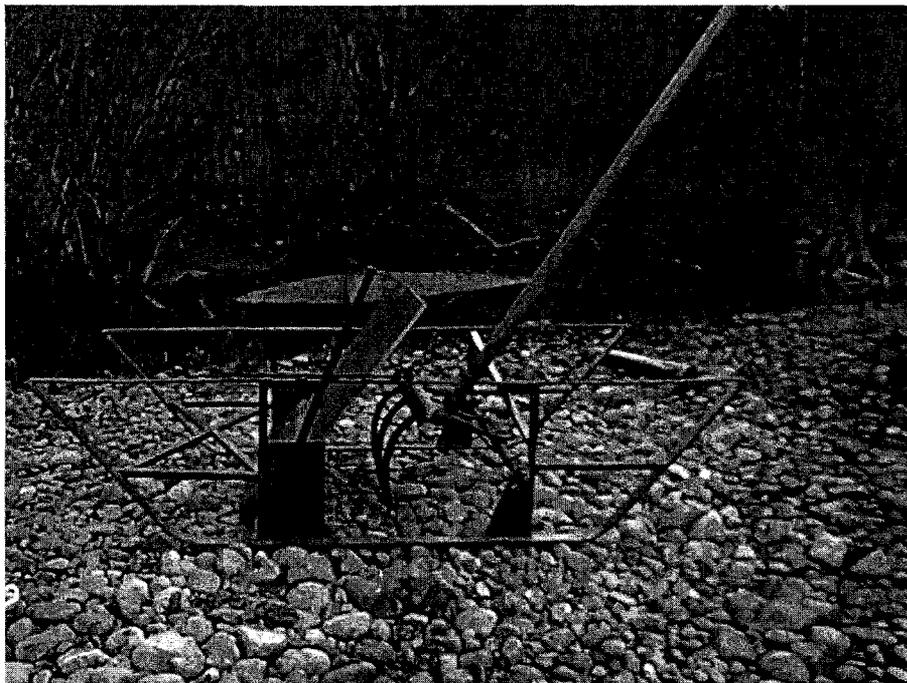


Figure 12. Photo du prototype de traîneau déflecteur testé sur le terrain.

3.3.2 Description du prototype de terrain

Le traîneau déflecteur utilisé sur le terrain (figure 12) est constitué d'une structure métallique (150 cm de long x 90 cm de large x 40 cm de haut) dont la base forme deux patins (150 cm de long x 5 cm de large) permettant de faire glisser le traîneau à la surface du lit. Un déflecteur de courant (75 cm de large x 75 cm de haut) à inclinaisons variables et trois griffes de labour sont fixés à la structure métallique. La base du déflecteur est située à 10 cm au-dessus du lit de façon à permettre un dégagement suffisant pour les pierres les plus grosses. L'angle du déflecteur peut être fixé entre 10 et 90 degrés et est contrôlé par l'opérateur à l'aide d'un manche de 1 m de long qui dépasse au-dessus de la structure du traîneau. Lors des premiers essais, une bavette en caoutchouc a été ajoutée à la base du déflecteur afin d'augmenter la concentration de l'écoulement à la surface du lit. Les griffes sont constituées d'erses métalliques de 30 cm de hauteur dont la profondeur de pénétration dans le substrat est contrôlée par l'opérateur à l'aide d'un manche.

3.3.3 Sites et méthodes

Les essais ont été effectués sur la rivière Betsiamites, une rivière où l'imbrication des particules de surface est très grande et où l'on retrouve une abondance de sédiments fins dans certains sites de fraie.

Quatre sites différents ont fait l'objet d'un nettoyage à l'aide du prototype de traîneau déflecteur. Les quatre sites sont situés près du point kilométrique 65 sur la rivière. À chacun des sites, la composition granulométrique du substrat a d'abord été déterminée à partir d'un échantillon prélevé à l'aide d'une cellule d'isolation du courant (voir Annexe 2).

Le traîneau déflecteur a par la suite été utilisé afin de nettoyer le substrat dans la zone située immédiatement à côté de celle où l'échantillon du substrat a été prélevé. Pour les sites 1 à 3, un seul passage du déflecteur a été effectué au-dessus de la zone à nettoyer. Deux passages ont été effectués sur le site 4 afin de vérifier l'utilité d'effectuer des passages multiples. Un échantillon du substrat nettoyé a par la suite été prélevé en utilisant la méthode de la cellule d'isolation du courant. À ce moment, la distinction entre pavement et sous-pavement était très difficile à effectuer en raison de l'intense remaniement des sédiments causé par l'action combinée des griffes et du déflecteur. L'opérateur tentait alors de récolter à la surface du lit un échantillon dont l'épaisseur et le volume correspondaient à l'échantillon de pavement prélevé avant le nettoyage. Le même principe était ensuite appliqué au prélèvement de l'échantillon du sous-pavement.

3.3.4 Résultats de l'analyse granulométrique

Les figures 13, 14, 15 et 16 présentent les courbes granulométriques des échantillons de pavement et de sous-pavement prélevés respectivement aux sites 1, 2, 3 et 4 avant et après le passage du traîneau déflecteur.

Les figures 13, 14, 15 et 16 indiquent que pour trois des quatre sites d'essais, la courbe granulométrique du pavement après nettoyage est située à la droite de celle mesurée avant le nettoyage. Ce déplacement vers la droite indique que la granulométrie du pavement est plus grossière après nettoyage qu'avant, montrant ainsi que l'action du traîneau déflecteur a permis d'évacuer une partie des sédiments fins présents dans la couche de pavement. Ce résultat est exprimé plus clairement par la comparaison du pourcentage de sédiments inférieurs à 2 mm présent dans le pavement avant et après le nettoyage (Tableau 5). Pour les sites 1, 2 et 4, l'application du traîneau déflecteur a permis de réduire le pourcentage de sédiments fins respectivement de 61%, 88% et 52 %. Seul le site 3 a connu une augmentation de 65% du pourcentage de sédiments fins.

Les figures 13, 14, 15 et 16 montrent pour l'ensemble des sites un léger déplacement vers la gauche de la courbe granulométrique du sous-pavement après nettoyage, indiquant ainsi une granulométrie plus fine après l'application du traîneau qu'avant. Ce résultat est confirmé par l'analyse des pourcentages de sédiments inférieurs à 2 mm qui montrent une augmentation de la proportion de sédiments fins de 60%, 7%, 39% et 3% aux sites 1, 2, 3 et 4 respectivement (Tableau 6).

Tableau 5. Effet du déflecteur sur le pourcentage de sédiments inférieurs à 2 mm dans la couche de pavement.

	Avant	Après 1 passage	Après 2 passages	% de diminution
Site 1	15 %	6 %	—	61 %
Site 2	10 %	1 %	—	88 %
Site 3	14 %	23 %	—	-65 %
Site 4	22 %	21 %	11 %	52 %

Tableau 6. Effet du déflecteur sur le pourcentage de sédiments inférieurs à 2 mm dans la couche de sous-pavement.

	Avant	Après 1 passage	Après 2 passages	% de diminution
Site 1	12 %	19 %	—	-59 %
Site 2	17 %	18 %	—	-7 %
Site 3	15 %	20 %	—	-39 %
Site 4	20 %	22 %	20 %	3 %

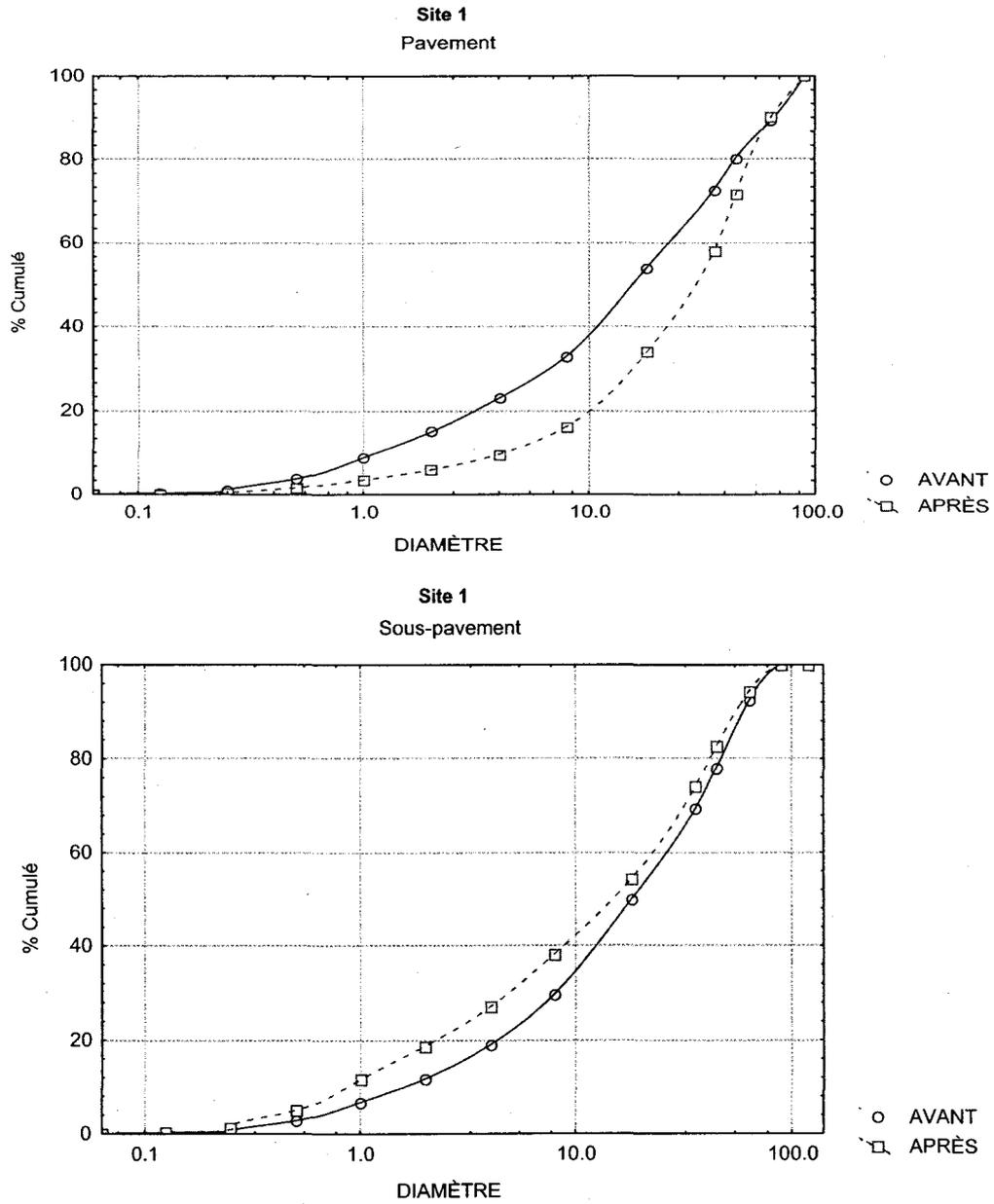


Figure 13. Comparaison de la composition granulométrique du site 1 avant et après l'application du déflecteur. A) Couche de pavement. B) Couche de sous-pavement.

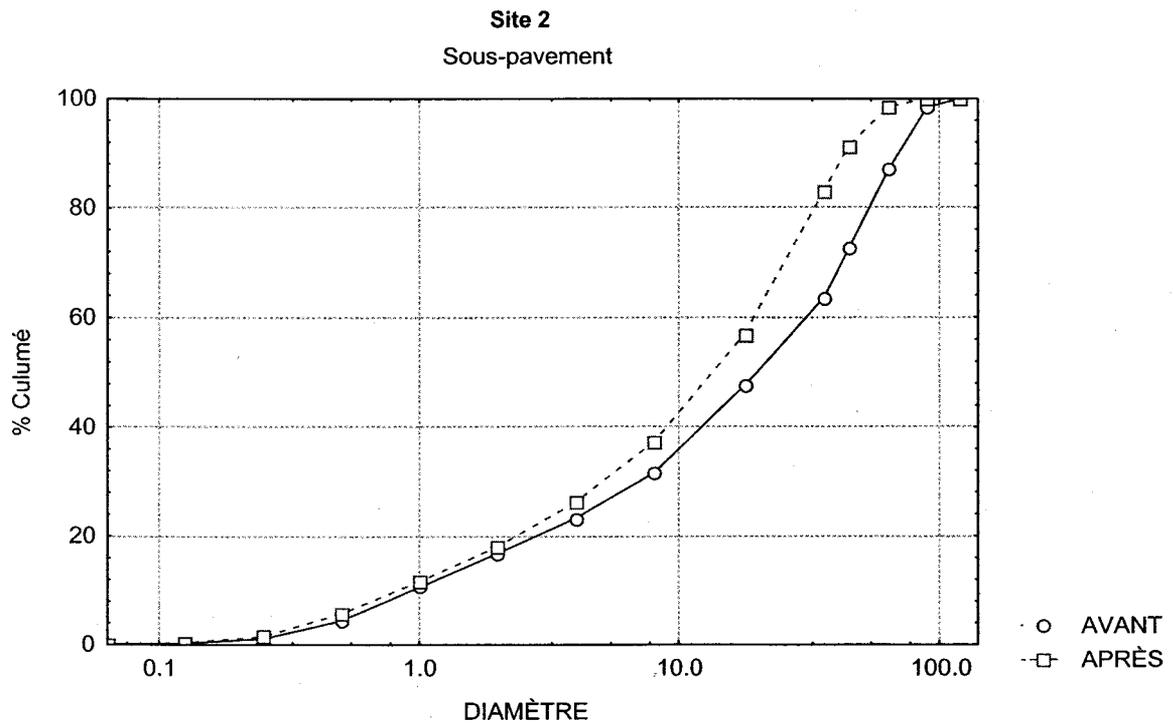
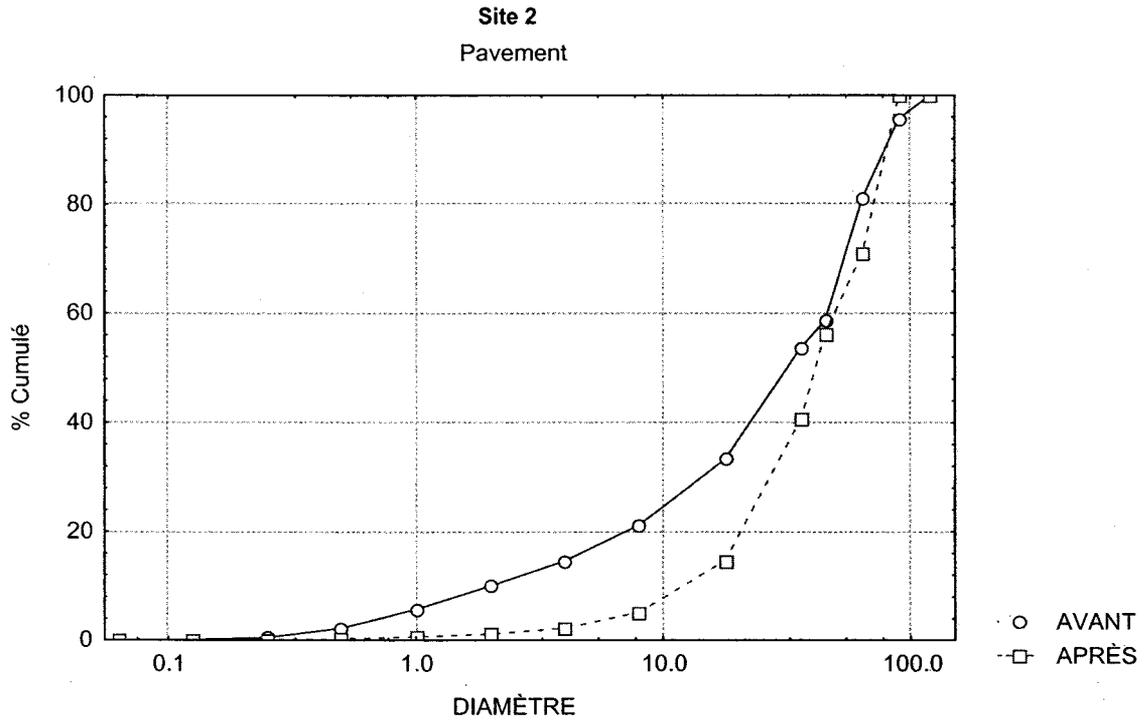


Figure 14. Comparaison de la composition granulométrique du site 2 avant et après l'application du déflecteur. A) Couche de pavement. B) Couche de sous-pavement.

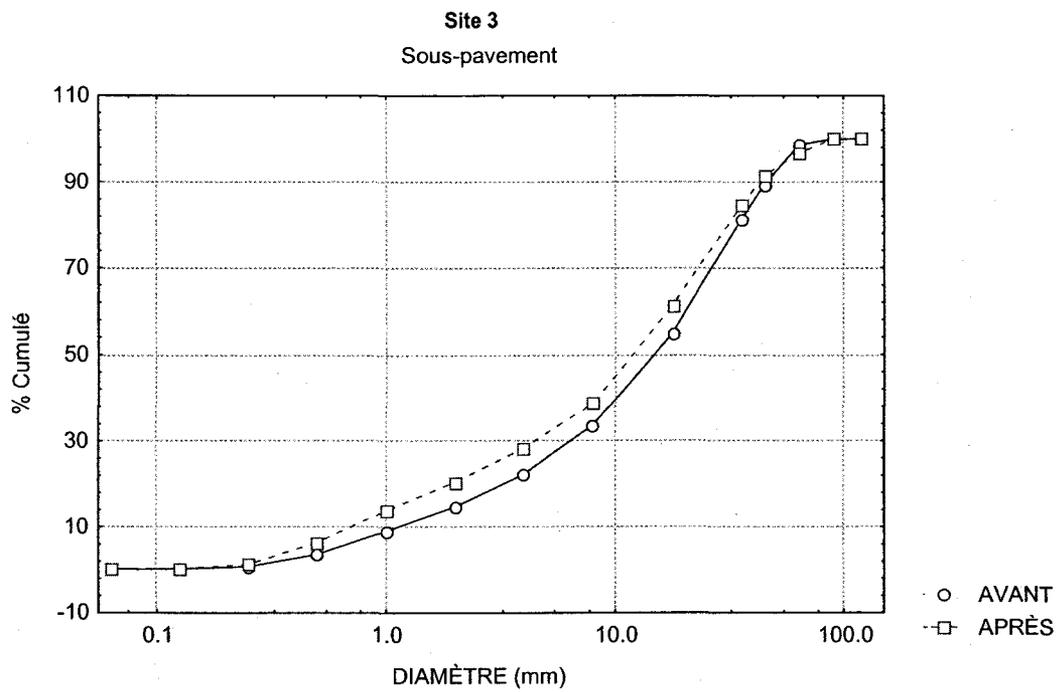
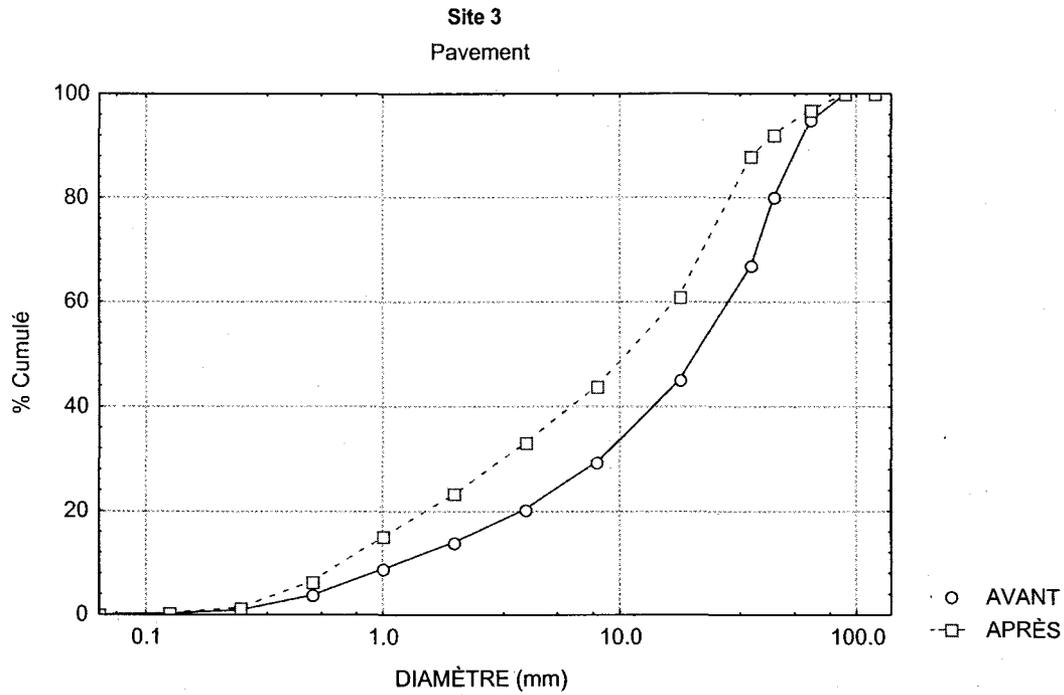


Figure 15. Comparaison de la composition granulométrique du site 3 avant et après l'application du déflecteur. A) Couche de pavement. B) Couche de sous-pavement.

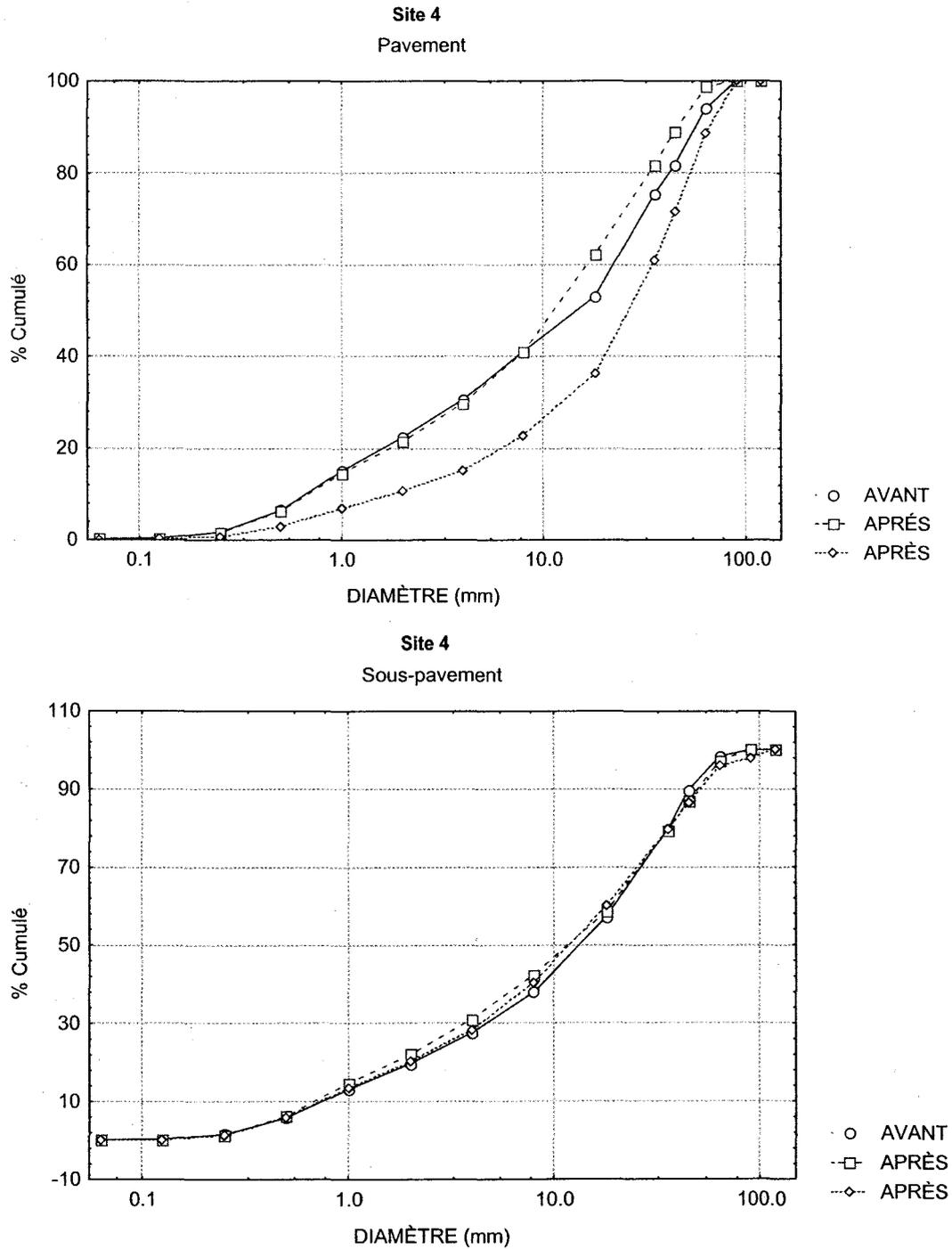


Figure 16. Comparaison de la composition granulométrique du site 4 avant et après l'application du déflecteur. A) Couche de pavement. B) Couche de sous-pavement.

3.3.5 Conclusions

3.3.5.1 Efficacité du traîneau déflecteur

Les résultats de l'analyse granulométrique montrent qu'à cette étape, le prototype du traîneau déflecteur est efficace pour diminuer la proportion de sédiments fins dans la couche superficielle du substrat qui correspond au pavement. Par contre, l'utilisation du traîneau entraîne une augmentation parfois importante de la proportion de sédiments fins dans le sous-pavement. Des observations effectuées par les opérateurs lors du nettoyage ont permis d'attribuer cette situation à deux facteurs principaux. Premièrement, le remaniement du substrat causé par l'action des griffes semble causer l'incorporation d'une partie des sédiments fins du pavement dans le sous-pavement. Deuxièmement, le déflecteur semble très efficace pour soulever les sédiments fins (figure 17) au-dessus du substrat sur une distance d'environ 20 cm. Par contre, une partie de ces sédiments se redépose ensuite à la surface du lit, là où l'action combinée des griffes et du déflecteur a contribué à créer une surface hautement poreuse qui facilite l'infiltration des sédiments en profondeur.



Figure 17. Photo de mise en suspension des sédiments par le traîneau déflecteur.

La prochaine étape de développement du traîneau déflecteur prévoit la conception d'un mécanisme de récupération/évacuation des sédiments soulevés par l'action du déflecteur avant que ceux-ci ne se redéposent à la surface. Nous prévoyons que l'ajout de cette fonctionnalité permettra d'augmenter de façon considérable l'efficacité du traîneau déflecteur à réduire le pourcentage de sédiments fins contenus dans le pavement et le sous-pavement.

3.3.5.2 Efficacité des griffes

L'installation de griffes à l'avant du traîneau déflecteur constitue une amélioration importante au prototype. Plusieurs frayères potentielles sont parfois inutilisées par les salmonidés en raison de l'imbrication (induration) des particules de surface qui empêchent les poissons d'y creuser leur nid. L'essai des griffes sur le terrain a procuré des résultats très intéressants. Bien que l'effet des griffes soit difficile à quantifier, les opérateurs ont pu constater que celles-ci avaient pour effet d'ameublir considérablement le substrat à un point tel que les pieds d'une personne marchant dans la rivière avaient tendances à s'enfoncer dans le substrat.

3.3.5.3 Déplacement du traîneau

Lors des essais sur le terrain, le traîneau était tiré de l'aval vers l'amont sur la zone à nettoyer au moyen d'un treuil à main fixé à une tige de métal plantée dans le substrat de la rivière. D'une façon générale, le traîneau s'est montré relativement facile à manipuler de cette manière. La principale amélioration au déplacement du traîneau viendra de l'élargissement des patins, qui en raison de leur étroitesse avaient tendance à s'enfoncer dans le substrat ameubli par les griffes.

3.4 Terrain phase B

3.4.1 Objectifs

Les objectifs de ces travaux de terrain étaient de 1) déterminer la persistance du nettoyage pour toute la période d'incubation et 2) déterminer l'effet de ce nettoyage sur les pourcentages de survie d'œufs de saumon atlantique.

3.4.2 Description du matériel

Une partie des travaux présentés dans la présente phase (i.e. phase B) a été effectuée avec la version intégrale de l'appareil (figure 12). Par contre, la deuxième partie des travaux a été effectuée à l'aide du traîneau déflecteur ayant subi des modifications mineures. Les griffes présentes à l'avant du panneau déflecteur ont été séparées du traîneau. Cette modification a été effectuée afin de réduire la friction du traîneau contre l'écoulement naturel de la rivière. Une moins grande force est alors nécessaire afin de remorquer le traîneau. Les griffes ont été montées sur une structure indépendante (figure 18) inspirée d'outils agricoles utilisés pour le labour de terrain. Enfin, les patins du traîneau ont été élargis afin d'empêcher la structure de s'enfoncer dans le lit de la rivière lors de son utilisation.



Figure 18. Photo des griffes utilisées pour la démobilitation du substrat.

3.4.3 Sites et méthodes

Les travaux de terrain ont été effectués sur deux rivières à saumon : la rivière Sainte-Marguerite située au Saguenay ainsi que la rivière Betsiamites située sur la Côte Nord. Ces deux rivières possèdent des types de frayères très différentes au point de vue sédimentologique. La Sainte-Marguerite contient beaucoup de sables moyens et grossiers, tandis que la Betsiamites présente un grand pourcentage de sédiments très fins (silts). L'hydrologie des deux rivières est aussi très différente, car la rivière Betsiamites est contrôlée par un ouvrage hydroélectrique. Ce barrage est utilisé en tant que centrale de pointe par ses gestionnaires. Ce type de gestion implique de fortes et fréquentes fluctuations du débit de la rivière.

La Sainte-Marguerite a été étudiée durant la période d'incubation 2001-2002 et la Betsiamites durant la période d'incubation 2002-2003. Des sites de fraie ont été sélectionnés sur les deux rivières à l'étude et chacun de ces sites a été subdivisé en zones. Les différentes zones ont été caractérisées sédimentologiquement dans leur état initial. Par la suite, certaines ont été nettoyées à l'aide du traîneau déflecteur et les autres laissées dans leur état initial. Les surfaces nettoyées ont alors été de nouveau caractérisées afin de mesurer l'effet immédiat du traîneau déflecteur. Des cubes (voir Annexe 2) contenant des œufs de saumon (100) ont été installés dans chaque zone à l'automne. Ces cubes sont restés dans le substrat pour toute la période d'incubation et retirés au printemps, juste avant l'émergence des alevins du substrat. Ce protocole permet de mesurer l'effet à court et à long terme du nettoyage sur la qualité du substrat de fraie, ainsi que d'évaluer l'impact direct du nettoyage sur la qualité d'incubation des œufs de saumon atlantique.

3.4.4 Résultats

3.4.4.1 Rivière Sainte-Marguerite, court terme

Les tableaux 7 et 8 montrent les différences de pourcentage de sédiments fins (< 2 mm) contenus dans le substrat avant et immédiatement après le nettoyage à l'aide du traîneau déflecteur. Ces données proviennent des échantillons prélevés à l'aide de la cellule d'isolation du courant (voir Annexe 2). Les résultats indiquent une diminution substantielle du pourcentage de sédiments fins dans le pavement ainsi que dans le sous-pavement. On remarque que les plus fortes améliorations se produisent lorsque le lit possède une grande quantité de sédiments fins avant le nettoyage. Les résultats montrent aussi une plus grande action du nettoyage dans la couche du pavement (tableau 7). Ce phénomène est explicable par le principe de fonctionnement du traîneau déflecteur qui implique une action plus directe sur la couche superficielle du lit de la rivière.

Tableau 7: Effet du déflecteur sur le pourcentage de sédiments inférieurs à 2 mm dans la couche du pavement. Rivière Sainte-Marguerite.

	Avant	Après	% de diminution
Zone 1	5.7 %	5.0 %	12.3 %
Zone 2	19.9 %	10.9 %	45.2 %

Tableau 8: Effet du déflecteur sur le pourcentage de sédiments inférieurs à 2 mm dans la couche du sous-pavement. Rivière Sainte-Marguerite.

	Avant	Après	% de diminution
Zone 1	14.7 %	13.9 %	5.4 %
Zone 2	17.5 %	13.6 %	22.3 %

3.4.4.2 Rivière Sainte-Marguerite, long terme

La persistance à long terme de l'effet du nettoyage a été vérifiée en comparant l'état du substrat au printemps des différentes zones d'échantillonnage qui avaient été nettoyées ou non à l'automne. La figure 19 présentent les pourcentages de sédiments fins contenus dans les cubes au printemps dans les zones nettoyées et non nettoyées.

La figure 19 indique qu'en moyenne, les zones nettoyées à l'automne contiennent moins de sédiments inférieurs à 2 mm à la fin de la période d'incubation. La figure 19 montre la même tendance pour les sédiments inférieurs à 63 microns. Ce type de sédiments (< 63 microns) est considéré comme étant très néfaste au bon développement des embryons (Hobbs, 1937; Acornley et Sear 1999).

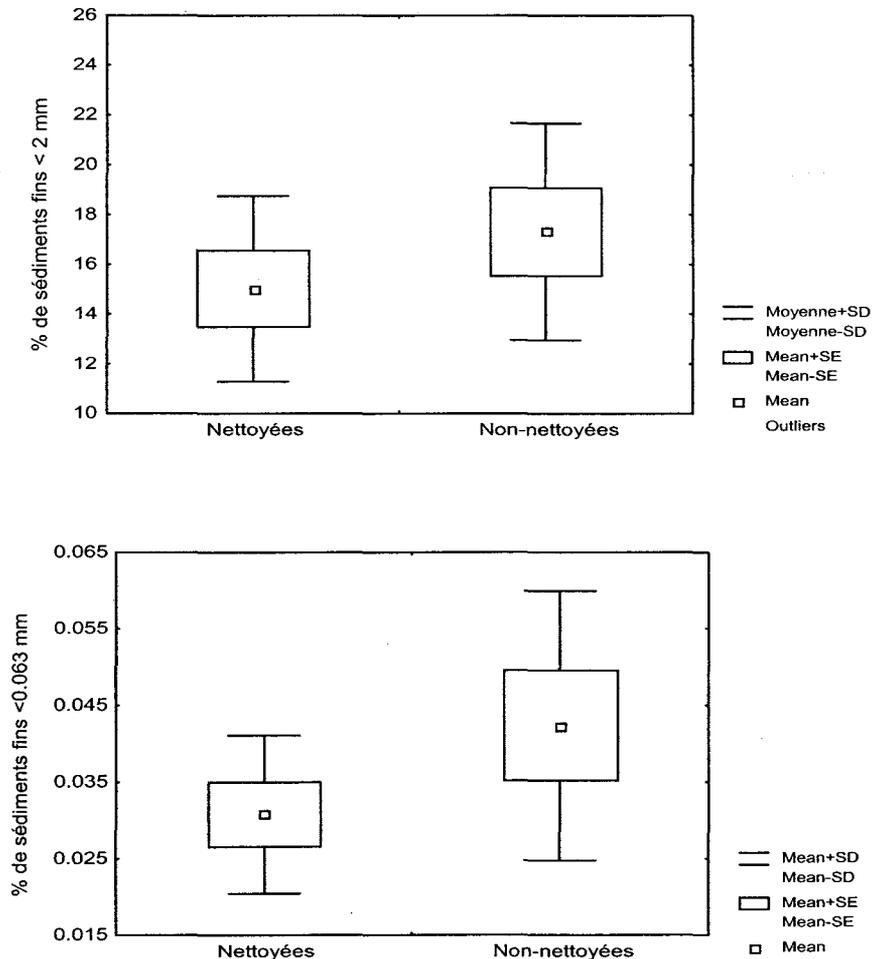


Figure 19. Comparaison des pourcentages de sédiments fins présents dans les cubes au printemps dans la rivière Sainte-Marguerite. A) Sédiments inférieurs à 2 mm. B) Sédiments inférieurs à 0.063 mm.

Le tableau 9 présente les différences de pourcentage de sédiments fins au printemps entre les zones qui avaient été nettoyées et non nettoyées à l'automne. On remarque que plus les sédiments sont fins (donc potentiellement nuisibles pour les embryons) plus l'effet du nettoyage à long terme est observé.

Tableau 9. Comparaison granulométrique à long terme entre les zones nettoyées et non-nettoyées. Rivière Sainte-Marguerite.

	Nettoyées	Non-nettoyées	% de différence
< 2 mm	15.0 %	17.3 %	12 %
Sable grossier	14.0 %	16.0 %	13 %
Sable fin	1.0 %	1.3 %	23 %
Silt	0.03 %	0.04 %	25 %

3.4.4.3 Rivière Betsiamites, court terme

L'échantillonnage granulométrique avant et après le nettoyage a été effectué à l'aide de l'échantillonneur McNeil (voir Annexe 2), le tableau 10 résume les résultats. Une diminution des pourcentages de sédiments fins est observée pour chaque classe granulométrique.

Tableau 10. Effets du déflecteur sur le pourcentage de sédiments fins. Rivière Betsiamites.

	Avant	Après	% diminution
<2mm	24.8 %	22.56 %	9.1 %
Sable grossier	11.55 %	10.12 %	6.33 %
Sable fin	11.84 %	11.09 %	12.38 %
Silt	1.42 %	1.36 %	4.23 %

3.4.4.4 Rivière Betsiamites, long terme

Le tableau 11 indique les pourcentages de sédiments fins (<2 mm) dans les cubes récoltés au printemps pour les différentes zones étudiées. Les résultats indiquent que l'effet du nettoyage effectué sur la Betsiamites ne semble pas persister jusqu'au printemps. Aucune tendance claire ne semble révéler les effets des interventions effectuées à l'automne. Les fortes et fréquentes variations du débit de cette rivière peuvent probablement expliquer la disparition plus rapide de l'effet du nettoyage.

Tableau 11. Comparaison granulométrique à long terme entre les zones nettoyées et non-nettoyées. Rivière Betsiamites.

	Nettoyées	Non nettoyées	% de différence
Zone 1	15.31 %	17.99 %	15 %
Zone 2	15.55 %	14.53 %	- 7 %

3.4.4.5 Taux de survie

La mesure qui intègre le mieux les effets du nettoyage sur la qualité du substrat de fraie est sans contredit l'incubation d'œufs de saumon atlantique sur les sites étudiés. La figure 20 montre les pourcentages de survie des œufs incubés dans le substrat de la rivière Sainte-Marguerite pour les zones nettoyées et non-nettoyées. Malgré que cette rivière possède à l'état naturel de très bons taux de survie, les résultats montrent une augmentation de la moyenne des taux de survie pour les zones nettoyées. Le nettoyage du substrat permet de diminuer la variance de la survie des embryons et d'optimiser l'ensemble des résultats en des taux de survie très élevés.

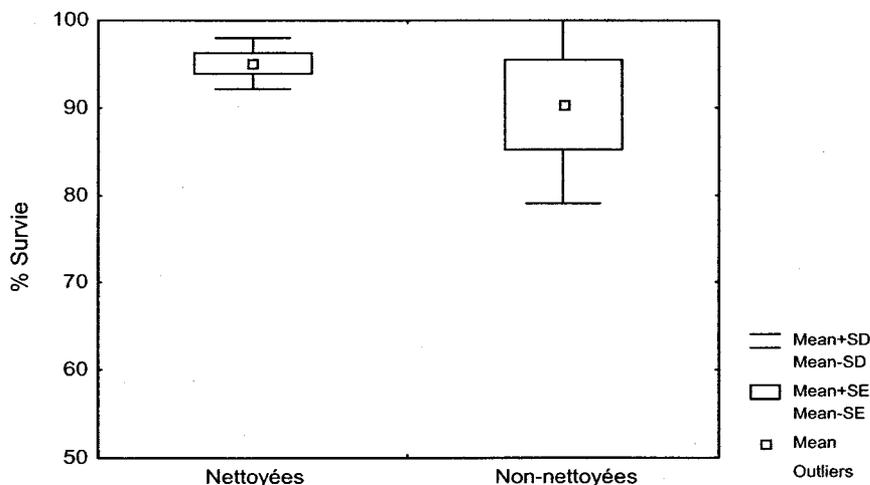


Figure 20. Comparaison des taux de survie entre les zones nettoyées et non-nettoyées pour la rivière Sainte-Marguerite.

La figure 21 présente les taux de survie des embryons pour la rivière Betsiamites. Les frayères sur cette rivière sont de faible qualité pour l'incubation des œufs. Par contre, le nettoyage a amélioré grandement les taux de survie. Sans améliorer systématiquement les résultats sur tous les sites d'étude, le nettoyage a permis d'atteindre des taux de survie

nettement supérieurs par rapport aux zones laissées dans leur état naturel. Le tableau 12 résume les tests d'incubation pour les deux rivières. On remarque que le nettoyage effectué sur la rivière Betsiamites a permis de faire passer la qualité du substrat d'incubation au-delà des conditions minimales requises pour la viabilité des embryons. Les taux de survie sont passés d'une valeur pratiquement nulle (4.7%) à une valeur moyenne de 24 %.

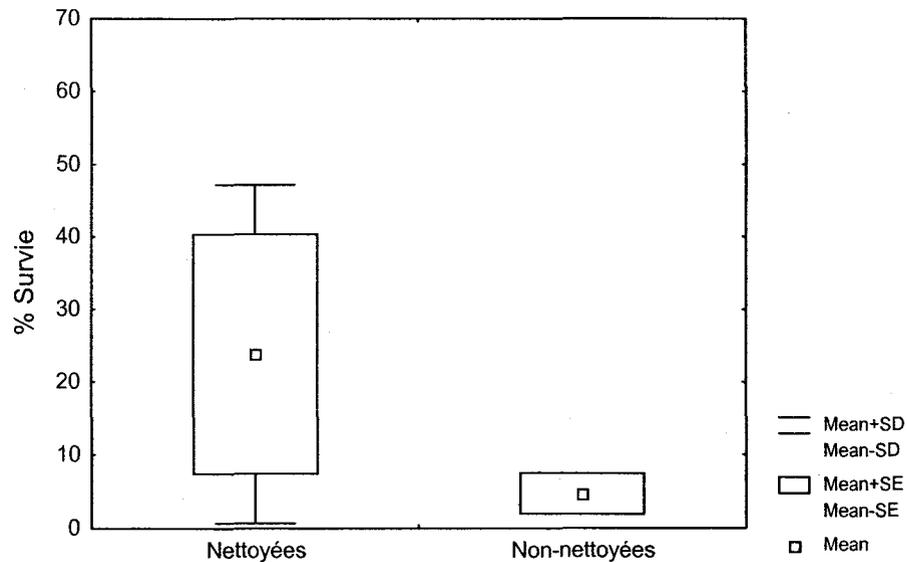


Figure 21. Comparaison des taux de survie entre les zones nettoyées et non-nettoyées pour la rivière Betsiamites.

Tableau 12. Comparaison des taux de survie entre les zones nettoyées et non-nettoyées.

	Non nettoyées	Nettoyées	Amélioration du taux de survie (%)
Betsiamites	4.7 %	23.95 %	510 %
Sainte-Marguerite	90.36 %	95.08 %	5 %

3.4.5 Conclusion

3.4.5.1 Persistance du nettoyage et taux de survie

Les analyses granulométriques présentées dans cette partie du rapport montrent les effets immédiats du nettoyage sur le sédiment de fraie. L'utilisation des griffes et du traîneau déflecteur permet d'obtenir dans tous les cas étudiés une diminution du pourcentage de sédiments fins contenus dans le substrat des frayères, qui dans certains cas peut atteindre une diminution de 45 %. Par contre, les résultats des analyses sur la persistance à long terme du nettoyage ne sont pas homogènes d'une rivière à l'autre. Les effets du nettoyage sur la rivière Sainte-Marguerite sont mesurables à long terme. En effet, les zones nettoyées sur cette rivière possèdent, durant toute la période d'incubation des œufs, un substrat plus grossier que les zones non-nettoyées. Par contre, les effets du nettoyage sur les frayères de la rivière Betsiamites semblent disparaître plus rapidement. Les zones nettoyées à l'automne ont atteint au printemps les mêmes pourcentages de sédiments fins que les zones non-nettoyées. Le pourcentage élevé de sédiments fins présents dans cette rivière ainsi que les fréquentes fluctuations du débit peuvent probablement expliquer la recontamination des zones nettoyées par de nouveaux sédiments fins. Malgré la disparition des effets du nettoyage à long terme sur le substrat de fraie de la Betsiamites, les tests d'incubation menés sur les sites d'étude procurent des informations très intéressantes sur les effets globaux des interventions. Dans tous les cas étudiés, les taux de survie ont été améliorés après un nettoyage. Le cas de la Betsiamites, démontre une incidence intéressante du nettoyage. Les données recueillies sur le terrain ne peuvent pas nous indiquer la persistance des effets du nettoyage, mais les interventions de l'automne semblent suffisantes pour globalement améliorer la qualité de la frayère. Le but premier de ce projet étant la restauration de la qualité du substrat de fraie des salmonidés, le succès positif des tests d'incubation nous confirme la validité de notre approche de travail.

3.5 Terrain phase C

3.5.1 Description du matériel

Comme prévu dans les phases antérieures du rapport, le traîneau déflecteur a été modifié. Une nouvelle fonctionnalité a été ajoutée. L'action du déflecteur est de concentrer l'écoulement sur le lit de la rivière. Les données de terrain recueillies dans ce rapport démontrent que ce principe de fonctionnement permet une bonne mise en mouvement des particules fines présentes sur le lit et l'évacuation d'une bonne quantité des sédiments. Mais les opérateurs du traîneau déflecteur ont noté qu'une grande quantité de sédiments fins se déposait à l'arrière du traîneau après avoir été mis en mouvement. C'est sur ces observations que nous avons doté le traîneau d'un système permettant la récupération des sédiments mis en mouvement par le déflecteur. La figure 22 montre une photo des modifications effectuées sur l'appareil.

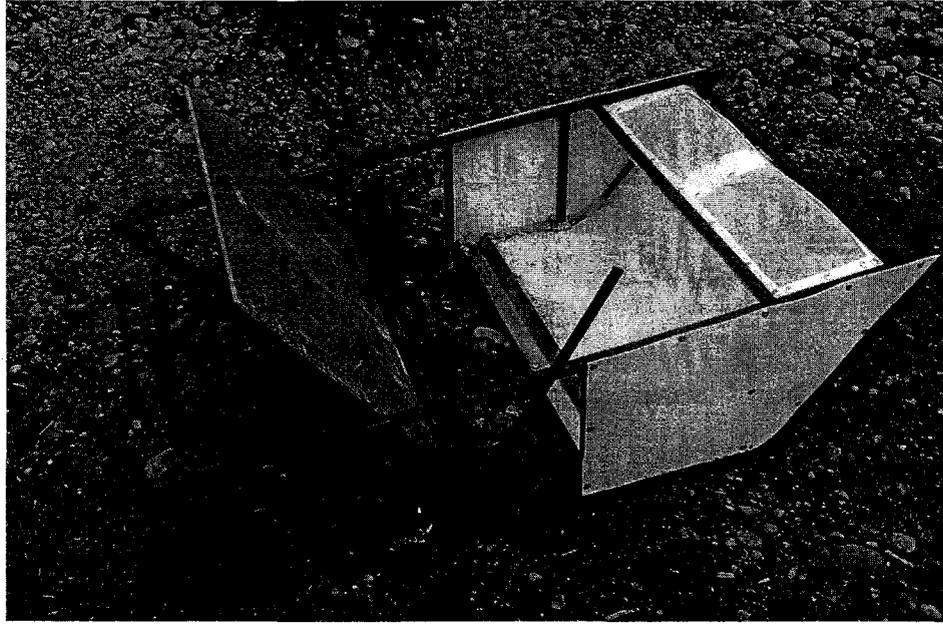


Figure 22. Photo du traîneau déflecteur adapté à la récupération des sédiments.

Les modifications apportées au traîneau consistent à l'ajout d'un bac placé derrière la base du déflecteur. Les sédiments soulevés par l'action du déflecteur sur le lit sont ensuite trappés à l'intérieur de ce caisson semi-ouvert. Une bande métallique anti-retour est placée à l'entrée du récipient afin d'éviter que les sédiments contenus dans le bac ne soient redéposés sur le lit une fois ramassés. Afin de faciliter l'écoulement derrière le déflecteur et d'éviter une trop grande turbulence dans le bac, des parois grillagées ont été installées derrière le bac. Ces parois laissent passer l'eau et évitent ainsi un trop grand brassage dans le réservoir, brassage pouvant éventuellement libérer les sédiments déjà trappés. Les sédiments assez petits et légers pouvant s'échapper par les grillages le sont suffisamment pour être éliminés du site d'intervention par l'écoulement naturel de la rivière.

3.5.2 Objectifs

Les objectifs de ces travaux de terrain étaient de 1) vérifier l'efficacité du traîneau à ramasser les sédiments soulevés par le déflecteur et 2) caractériser les types de sédiments pouvant être prélevés par le traîneau.

3.5.3 Site et méthodes

Les travaux de terrain ont été effectués sur la rivière Sainte-Marguerite au Saguenay sur un des sites de travail de la phase B. Une zone de la fraysère possédant de grandes quantités de sédiments en surface a été sélectionnée. Le traîneau déflecteur muni de son bac de récupération a été appliqué sur ces zones ensablées. Des échantillons granulométriques ont été prélevés à l'aide de l'échantillonneur McNeil dans la zone

nettoyée ainsi que dans les zones adjacentes afin d'être comparés. Les caractéristiques des sédiments amassés par le traîneau ont été analysées afin de connaître les limites d'application du traîneau et de son bac.

3.5.4 Résultats

Le tableau 13 présente les pourcentages de sédiments fins (< 2mm et < 1mm) prélevés dans les zones nettoyées et non nettoyées. Les résultats montrent des diminutions élevées de sédiments après l'application de l'appareil. Les résultats présentés dans la phase de terrain B du rapport montraient des diminutions de 12% et 45% des sédiments < 2mm (tableau 7). Lors de l'application du traîneau déflecteur, le bac accumulait les sédiments à un taux de 1.5 kilogrammes par mètre linéaire. La figure 23 présente les caractéristiques en pourcentage relatif de la distribution granulométrique contenue dans le bac. On remarque l'absence des plus petites classes granulométriques. Ces sédiments très fins sont mis en suspension par le déflecteur et ne sont pas trappés par le bac. Par contre, leur mise en suspension permet de les évacuer hors de la zone de travail. On remarque aussi l'absence des classes granulométriques supérieures. Le déflecteur n'a pas la force nécessaire à leur mise en mouvement. Le traîneau a été conçu pour le nettoyage du substrat de fraie, donc seulement les sédiments fins sont visés de par la conception de l'appareil. La figure 24 montre une photo du traîneau déflecteur contenant des sédiments fins dans son bac de récupération.

Tableau 13 : Pourcentages de sédiments fins (< 2mm et < 1mm) prélevés dans les zones nettoyées et non nettoyées.

	Nettoyées	Non nettoyées	% de diminution
< 2mm	6.94 %	14.38 %	52%
< 1 mm	2.51 %	8.01 %	69%

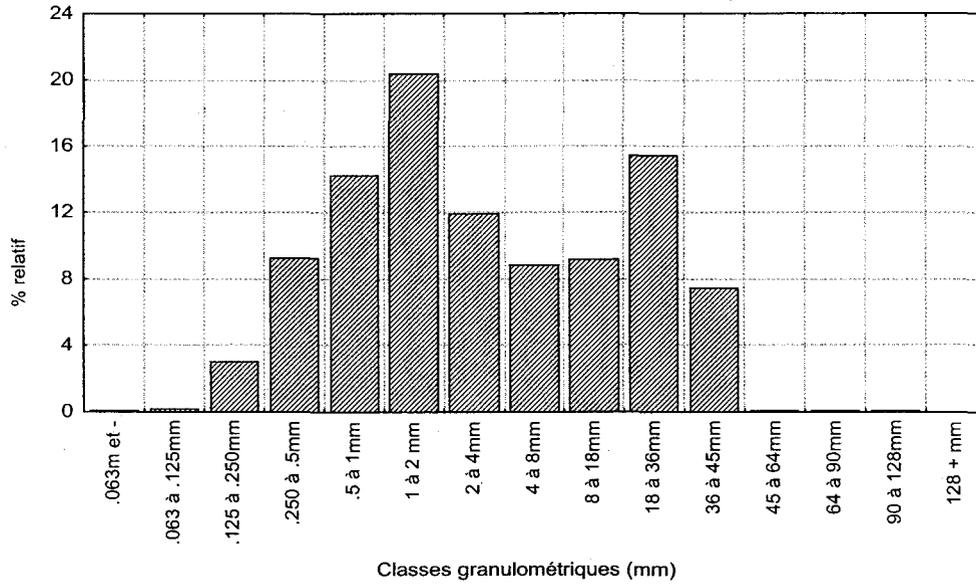


Figure 23. Distribution granulométrique des sédiments récupérés par le bac.

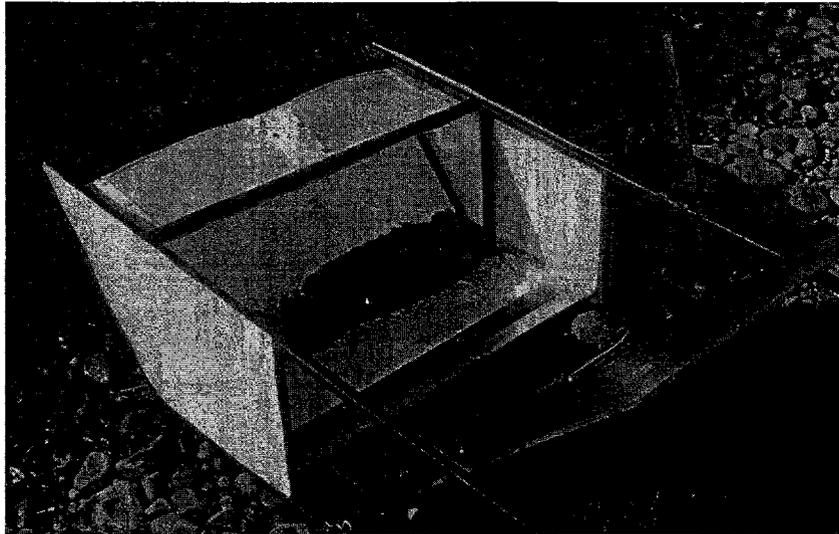


Figure 24. Photo du traîneau déflecteur ayant récupéré des sédiments dans son bac.

PARTIE 4

Tapis flottant

4.1 Description générale

Il s'agit d'un lourd tapis caoutchouté et rugueux déposé sur la zone à nettoyer (figure 25) et dont l'objectif consiste à concentrer l'écoulement vers le fond de la rivière afin d'augmenter la vitesse et la turbulence de l'écoulement près du lit.



Figure 25. Schéma de principe du tapis flottant.

4.2 Travaux de terrain

4.2.1 Objectifs

Les objectifs de ce terrain étaient de 1) vérifier la faisabilité du principe de fonctionnement du tapis et 2) mesurer l'effet du tapis sur la granulométrie de surface du substrat de fraie.

4.2.2 Site et méthodes

Les travaux de terrain ont été effectués sur la rivière Sainte-Marguerite au Saguenay. Le tapis a été construit à l'aide de bandes de caoutchouc de 8 mm d'épaisseur. Quatre bandes de 60 cm x 80 cm ont été reliées entre elles pour former un tapis de 2 mètres carrés. Les différentes bandes sont reliées entre elles à l'aide de pentures de plastique formant des joints souples. La tête du tapis est fixée en direction de l'amont à l'aide d'une armature d'acier. La conjonction entre le poids du tapis et l'écoulement naturel de la rivière induit au tapis un mouvement ondulatoire de va-et-vient du bas vers le haut. La figure 26 montre une séquence de photos démontrant le mouvement ondulatoire de l'appareil. Ces ondulations induisent sur le lit de la rivière des pulsations de courant augmentant ainsi les

forces de cisaillement et la turbulence. L'augmentation de ces deux variables a pour but de mettre en transport les sédiments fins présents à la surface du lit de la rivière. Le tapis a été placé sur une zone de fraie possédant une grande quantité de sables fins et moyens dans le substrat. Des échantillons granulométriques ont été prélevés à l'aide de l'échantillonneur McNeil sous le tapis et dans les zones adjacentes au tapis.



Figure 26. Séquence de photos montrant les mouvements ondulatoires du tapis.

4.2.3 Résultats

La figure 27 présente les données qui comparent les pourcentages de sédiments fins inférieurs à 2mm contenus dans les zones nettoyées et non nettoyées par le tapis flottant. Les données montrent une nette diminution du pourcentage de sédiments <2 mm. Le tapis a été en fonction durant 15 heures. La quantité de sédiments délogés peut être contrôlée par la durée de fonctionnement du tapis.

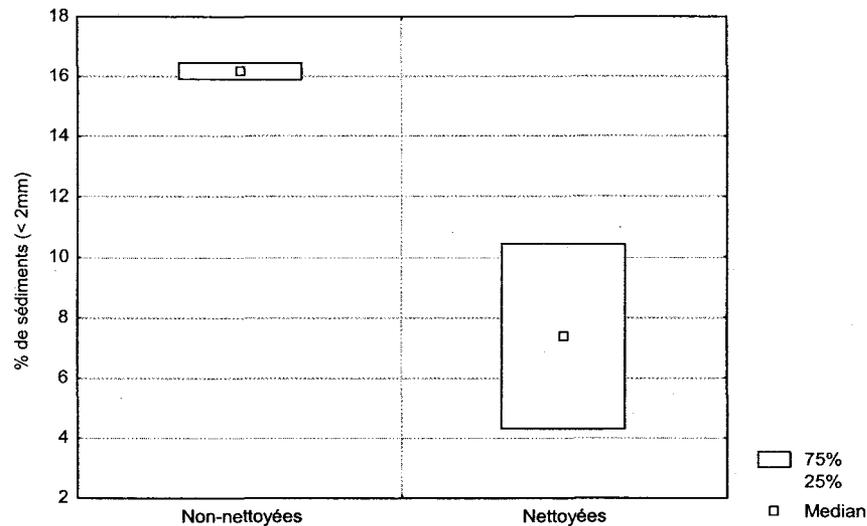


Figure 27. Pourcentage de sédiments <2 mm dans les zones nettoyées et non-nettoyées par le tapis flottant.

4.2.4 Conclusion

Les résultats montrent l'efficacité du tapis flottant à diminuer la quantité de sédiments fins présents dans la couche de pavement du substrat de fraie. Cette technique permet le nettoyage du substrat sans briser la structure sédimentaire présente.

PARTIE 5

Vortex tube

5.1 Description générale

Cette nouvelle technique, non présentée dans la demande de subvention originale, a pour but de couper l'apport de sédiments fins sur les frayères. Les sédiments en charge de fond arrivant sur la frayère sont déviés des zones de fraie par une structure installée dans le lit de la rivière en amont des sites à protéger. Les sédiments ainsi déviés sont ensuite libérés de nouveau dans la rivière et sont remis en transport de fond par l'écoulement naturel de la rivière. L'appareil est principalement constitué d'un tuyau possédant une ouverture longitudinale. La figure 28 montre une vue latérale du tuyau installé dans le lit de la rivière. De plus, le tuyau est placé avec un angle de 30 à 40 degrés par rapport à l'écoulement. La figure 29 montre une vue en plan de la position d'un vortex tube placé en rivière.

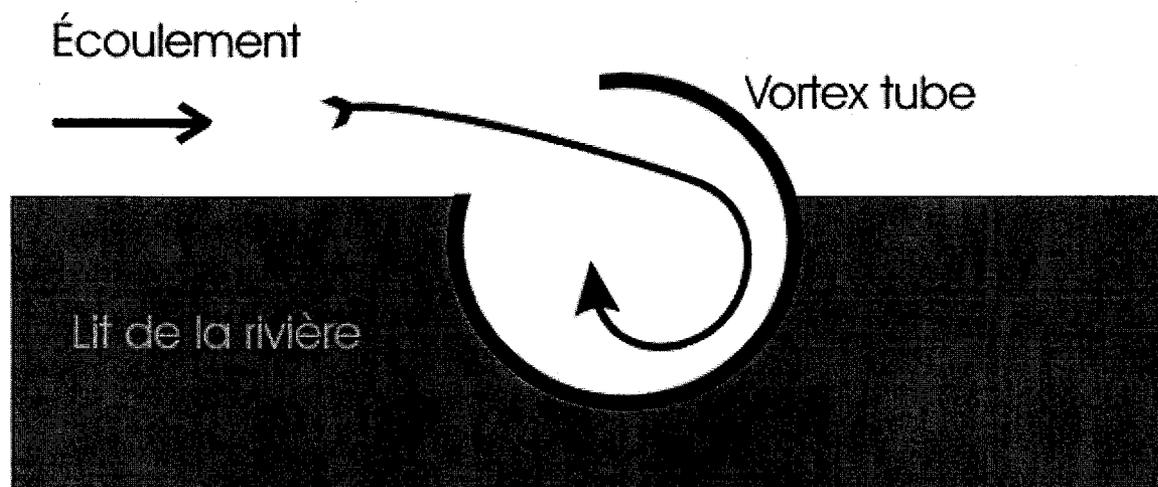


Figure 28. Schéma d'une coupe transversale du vortex tube dans le lit de la rivière.

La forme ainsi que la position du tuyau favorise la pénétration de l'écoulement à l'intérieur de celui-ci. Le fluide à l'intérieur du tuyau se déplace alors en un mouvement hélicoïdal. Les sédiments fins en transport sur le lit de la rivière sont trappés par le tuyau. Une fois à l'intérieur, les sédiments sont mis en mouvement par le fluide en déplacement hélicoïdal. Les sédiments sont alors transportés jusqu'à la partie aval de l'appareil pour ensuite être libérés de nouveau. Les sédiments sont ainsi déviés des zones de fraie. Ce type d'appareil est traditionnellement utilisé pour la mesure en continue du transport en charge de fond dans les rivières.

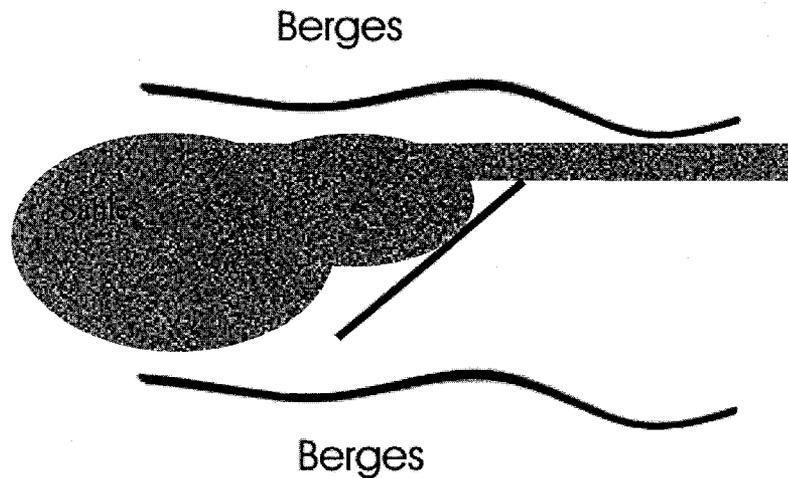


Figure 29. Schéma de la vue en plan du vortex tube placé en rivière.

5.2 Travaux de terrain

5.2.1 Objectif

L'objectif du terrain était de vérifier si un vortex tube placé en amont d'une frayère avait la capacité de dévier les sédiments en charge de fond arrivant sur la frayère.

5.2.2 Site et méthodes

Les travaux de terrain ont été effectués sur la rivière Sainte-Marguerite. Un vortex tube a été placé en amont d'une zone de fraie. Afin d'accélérer l'échantillonnage de terrain, une certaine quantité de sédiments fins a été déposée en amont du site. Cette dune de sédiment avait pour but de simuler un apport de sables fins et moyens arrivant sur une frayère par charge de fond. Après avoir laissé transiter le sable vers l'aval, des échantillons granulométriques ont été prélevés à l'aide de l'échantillonneur McNeil dans la zone protégée par le tube (i.e. dans le substrat en aval de celui-ci) ainsi que dans les zones périphériques non protégées par le tube. La figure 30 montre deux photos de l'installation du vortex tube sur le site de travail.

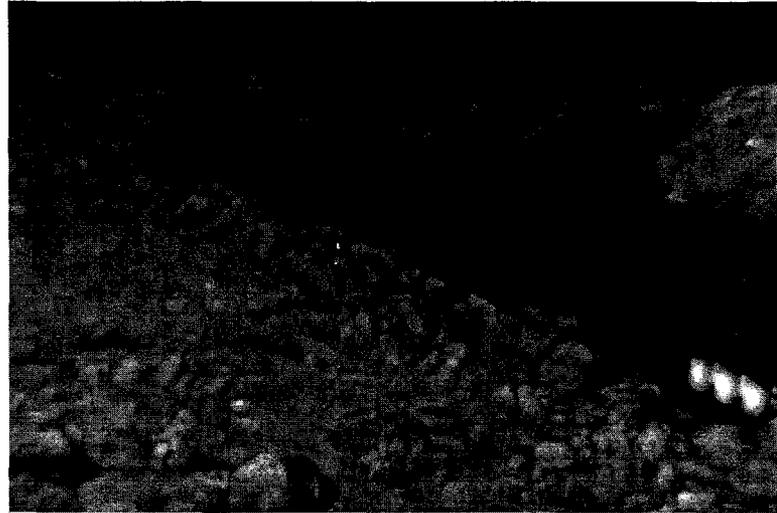


Figure 30. Deux photos de l'installation du vortex tube sur le site de travail.

5.2.3 Résultats et conclusion

La figure 31 présente les pourcentages de sédiments fin ($< 2\text{mm}$) contenus dans les différentes zones. La présence du vortex tube a permis de protéger la zone d'intérêt de l'apport de sédiments. De plus, la présence à long terme du vortex tube peut induire un nettoyage du substrat présent dans les zones en aval de sa position. En effet, lors d'événements hydrauliques importants (ex. : crues d'automne ou de printemps), les sédiments sont mis en transport. Les sédiments présents en aval du tube seront évacués de la zone tandis que la présence de l'appareil empêchera tout nouvel apport de sédiments fins sur le site de fraie situé en aval de ce dernier. Le résultat sera un bilan sédimentaire négatif, donc une élimination des sédiments fins sur le site.

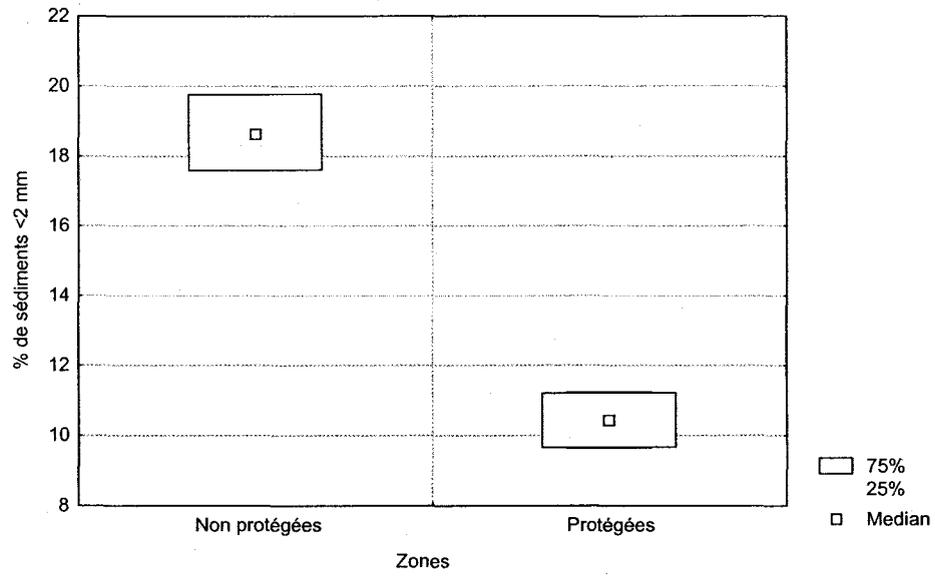


Figure 31. Pourcentages de sédiments fins (< 2mm) contenus dans les différentes zones.

PARTIE 6

Ruban d'entretien

6.1 Description générale

Le ruban d'entretien est une lanière de caoutchouc dont l'une des extrémités est fixée à une tige plantée dans le substrat (figure 32) et qui contribue à augmenter la turbulence de l'écoulement près du lit sous l'action de va-et-vient latéral qui lui est imprimée par le courant de la rivière.

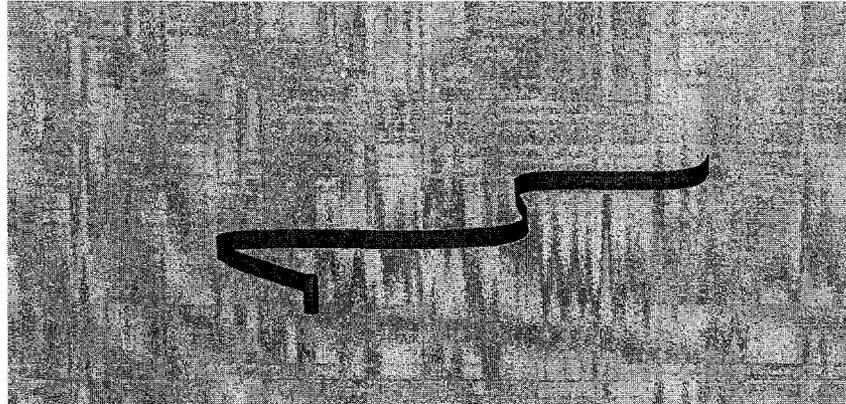


Figure 32. Schéma de principe du ruban d'entretien.

6.2 Conclusion

Plusieurs tests reliés au développement du ruban d'entretien ont été réalisés. Aucun prototype de ruban n'a atteint les critères minimums nécessaires à l'entretien du substrat de fraie. Ces résultats peu prometteurs ont provoqué l'abandon du ruban d'entretien pour ce projet. En effet, les oscillations latérales exigées pour le bon fonctionnement du ruban n'ont jamais atteint l'amplitude nécessaire à la mise en mouvement des sédiments fins. Cette approche a été remplacée par un autre concept d'entretien des frayères, le vortex tube (voir Partie 5).

PARTIE 7

Conclusion générale

Les données présentées dans ce rapport montrent l'efficacité des différentes techniques développées pour le nettoyage de frayères. Le traîneau déflecteur, qui est le principal appareil développé dans ce projet, permet une réduction substantielle des sédiments fins contenus dans le substrat de fraie. Les tests d'incubations d'œufs de saumon atlantique effectués sur les zones nettoyées par le traîneau ont montré l'efficacité de cette technique pour la restauration du substrat de fraie. De plus, l'application conjuguée des griffes et du traîneau permet la restauration de substrat possédant un pavé caractérisé par une imbrication excessive qui est en fait une limitation pour les saumons lors du creusage du nid. Les conditions hydrauliques prévalentes sur les sites d'intervention peuvent limiter l'utilisation du traîneau déflecteur. Par contre, les principales limitations lors de l'utilisation du traîneau sont associées aux trop fortes conditions hydrauliques qui sont elles-mêmes non favorables à l'accumulation de sédiments fins.

Des résultats très positifs ont été produits par l'utilisation du tapis flottant. L'application du tapis, moins agressive que le traîneau, permet des interventions plus légères ou la structure sédimentaire du substrat est préservée. De plus, le principe de fonctionnement du tapis permet des interventions durant la période d'incubation des œufs.

La protection des frayères par le vortex tube est une technique particulièrement intéressante, car elle peut être en fonction sur une longue période de temps. En effet, bien que plus lourd lors de son installation que les autres techniques, le vortex tube peut être installé dans le lit de la rivière pour de longues périodes de temps. Un système d'activation-déactivation peut aussi être greffé au tube. Ce système permet d'envisager une installation permanente de l'appareil.

Enfin, le choix approprié d'une technique d'intervention est relatif à la problématique prévalente sur la frayère cible. Les causes de la contamination du substrat par des sédiments fins doivent être connues. La détérioration d'une frayère par un événement ponctuel (ex. : glissement d'un talus en amont d'un site) ne nécessite pas le même type de protocole d'intervention que la protection d'une frayère dans un système où l'apport de sédiments fins est continu dans le temps.

PARTIE 8

Références

- Acornley, R.M. et Sear, D.A. (1999). Sediment transport and siltation of brown trout (*Salmon trutta L.*) spawning gravels in chalk streams. *Hydrological Processes* (13). pp. :447-458.
- Andrew, F.J. (1974). A technique for cleaning spawning gravel. *Inter. Paci. Salmon Fish. Comm.* pp :195-200.
- Argent, D. G. et Flebbe, P.A. (1999). Fine sediment effects on brook trout eggs in laboratory stream. *Fisheries Research* (39). pp. : 253-262.
- Avery, E.L. (1996). Evaluations of sediment traps and artificial gravel riffles constructed to improve reproduction of trout in three Wisconsin streams. *North American Journal of Fisheries Society* (16). pp. : 282-293.
- Beschta, R.L. et Jackson, W.L. (1979). The intrusion of fine sediments into a stable gravel bed. *J. Fish. Res. Board Can.* (36). pp. : 204-210.
- Boivin, J. (1998). Restauration et aménagement des habitats pour l'Ombre de fontaine dans les réserves fauniques de Portneuf et des Laurentides. Ministère de l'Environnement et de la Faune. pp. :1-8.
- Boivin, J., Dulude, P., Fournier, G. et Savard, M. (1998). Suivi des aménagements et des restaurations d'habitats de l'Ombre de fontaine dans la région de Québec. Ministère de l'Environnement et de la Faune. Présenté au Séminaire de la Fondation de la Faune du Québec sur « L'évaluation de travaux d'aménagement ou de protection d'habitats aquatiques, les 27 et 28 octobre 1998, Québec ». pp. :1-5.
- Boivin, J. (2000). Commentaires personnels lors d'une rencontre. FAPAQ.
- Boon, P.J. (1988) The impact of river regulation on invertebrate communities in the U.K., *Regulated Rivers: Research and Management*, vol. 2, pp. 389-409.
- Carling, P.A. (1984). Deposition of fine and coarse sand in an open-work gravel bed. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* (41). pp. : 263-270.
- Carling, P.A. et McCahon, C.P. (1987) Natural siltation of brown trout (*Salmo trutta L.*) spawning gravels during low-flow conditions, Pages 229-244 in J.F. Craig and J.B. Kemper (eds.), *Regulated streams: Advances in ecology*, Plenum Press, New York.
- Cascapédia menacée (La). (2000). Documentaire vidéo présenté par Marc Gauthier de la Coalition pour la gestion intégrée du Bassin Versant de la Cascapédia.
- Chapman, D.W. (1988). Critical review of variables used to define effects of fines in redds of large salmonids. *Transactions of the American Fisheries Society* (117), no.1. pp. :1-21.
- Cordone, A.J. et Kelly, D.W. (1961) The influence of inorganic sediment on the aquatic life of streams, *California Fish and Games*, vol. 47, pp. 189-228.

- Crisp, D.T. (1993). The ability of U.K. salmonid alevins to emerge through a silt layer. *Journal of Fish Biology* (43). pp :656-658.
- Davies-Colley, R.J., Hickey, C.W., Quinn, J.M. et Ryan, P.A. (1992) Effects of clay discharges on streams: 1. Optical properties and epilithon. *Hydrobiologia*, vol. 248, pp. 215-234.
- Everest, F.H., Reeves, G.H. et Sedell, J.R. (1989). Salmonid habitat : new beginnings through enhancement, but not without uncertainty, risk and failure. Proc. of Wild Trout, Steelhead and Salmon in the 21st Century, Portland, Oregon, July 19, 1986. pp. : 9-19.
- Flosi, G. et Reynolds, F.L.. (1991). California salmonid stream habitat restoration manual. California Department of Fish and Game, Sacramento.
- Frissell, C. A. et Nawa, R. K. (1992). Incidence and causes of physical failure of artificial habitat structures in streams of western Oregon and Washington. *North American journal of Fisheries Management* (12). pp. : 182-197.
- Fusilier, L. et Edds, D. (1995). An artificial riffle restored habitat for the threatened Neosho Madtom. *North american Journal of Fisheries Management* (15). pp. : 499-503.
- Groves, K. (2000). Commentaires personnels par courriel. BC Hydro.
- Hansen, E.A. et Alexander, G.R. et Dunn, W.H. (1982). Sand sediments in a Michigan trout stream. Part.1. In-stream sediment basins : a technique for removing sand bedload from streams. Michigan Department of Natural Resources. Fisheries Research Report 1901. Ann Arbor.
- Hellawell, J.M. (1988) River regulation and nature conservation, *Regulated Rivers: Research and Management*, vol. 2, pp. 425-443.
- Hermansen, H. et Krog, C. (1985). A review of brown trout (*Salmo trutta*) spawning beds, indicating methods for their re-establishment in Danish lowland rivers. In : Alabaster, J.S. (Ed.) Habitat Modification and Freshwater Fisheries. EIFAC Proc., FAO, Butterworths, London-Boston. pp. :116-123.
- Hobbs, D.F. (1937). Natural production of quinnat salmon, brown and rainbow trout in certain New Zealand waters. New Zealand Marine Department, Fisheries Bulletin (6), Wellington.
- Hutchinson, J. et Taylor, A., (1988). Sand traps improve trout streams : A trick for cleaning streams and trapping sediments. *Wisconsin Natural Resource*. May/June. pp. : 28-29.

- Kondolf, G.M. et Cada, G.F. et Sale, M. J. (1987). Assessing flushing-flow requirements for brown trout spawning gravels in steep streams. *Water Resources Bulletin*, American Water Resources Association (23), no.5. pp. : 927-935.
- Kondolf, G.M., Vick, J.C. et Ramirez, T.M. (1996). Salmon spawning habitat rehabilitation on the Merced River, California: An evaluation of project planning and performance. *Transactions of the American Fisheries Society*. Nov. 01, vol. 125, no. 6. pp. : 899- 912.
- Kondolf, G.M. et Wilcock, P.R. (1996). The flushing flow problem : Defining and evaluating objectives. *Water Resources Research* (32), no.8. pp. : 2589-2599.
- Lisle, T.E. (1989). Sediment transport and resulting deposition in spawning gravels, north coastal California. *Water Resources Research* (25). pp. : 1303-1319.
- Lisle, T.E. et Eads, R.E. (1991). Methods to measure sedimentation of spawning gravels. US For. Serv.Res. Note, PSW-411. 8 pages.
- Marchant, R. (1989) Changes in the benthic invertebrate communities of the Thomson River, Southeastern Australia, after dam construction, *Regulated Rivers: Research and Management*, vol. 4, pp. 71-89.
- Meehan, W.R. (1971). Effects of gravel cleaning on bottom organisms in three southeast Alaska streams. Forest Service, U.S. Department of Agriculture. Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, Juneau, Alaska. pp :107-111.
- Mih, W.C. (1978). A review of restoration of stream gravel for spawning and rearing of salmon species. *Fisheries*, vol.3, no.1. pp :16-18.
- Mih, W.C. et Bailey, G.C. (1981). The development of a machine for the restoration of stream gravel for spawning and rearing of salmon. *Fisheries* (6), no.6. pp :16-20.
- Milhous, R.T. (1990). Calculating of flushing flows for gravel and cobble bed rivers. Dans *Hydraulic Engineering*, vol.1. *Proceedings of the 1990 National Conference*. Eds. : H.H. Chang et J.C. Hill. Am. Soc. of Civ. Eng., New York. pp. : 598-603.
- Milhous, R.T. et Bradley, J.B. (1986). Physical habitat simulation and the moveable bed. Dans *Water Forum '86 : World Water Issues in Evolution*, vol.2. Am. Soc. of Civ. Eng., New York. pp. : 1976-1983.
- Newcombe, C.P. et Jensen, J.O.T. (1996). Channel suspended sediment and fisheries : A synthesis for quantitative assessment of risk of impact. *North American Journal of fisheries Management* (16), no. 4. pp. : 693-727.
- Olmsted, R. Communication d'un rapport par courrier électronique. Chapitre 5 : Incubation habitat enhancement. BC Hydro.

- Petts, G.E. (1988) Accumulation of fine sediment within substrate gravels along two regulated rivers, U.K., *Regulated Rivers: Research and Management*, vol. 2, pp. 141-153.
- Platts, W.S., Torquemada, R.J., McHenry, M.L. et Graham, C.K. (1989). Changes in salmon spawning and rearing habitat from increased delivery of fine sediment to the South Fork Salmon River. Idaho. *Trans. Am. Fish. Soc.* (118). pp. :274-283.
- Richards, C., Host, G.H. and Arthur, J.W. (1993) Identification of predominant environmental factors structuring stream macroinvertebrate communities within a large agricultural catchment, *Freshwater Biology*, vol. 29, pp. 285-294.
- Rowe, M., Spaulding, S., Gunderman, J.M. et Bacon, K. (1989). Salmon river habitat enhancement. Annual Report. Shoshone-Bannock Tribes Annual Report, Bonneville Power Administration, Portland, OR, Project No. 83-359. (Résumé seulement)
- Schuett Hames, D., Conrad, B., Pleus, A. and Smith, D. (1996). Field comparison of McNeil sampler with three shovel-based methods used to sample spawning substrate composition in small streams. Report. Northwest Indian Fisheries Commission. TFW Ambient Monitoring Program. 29 pages.
- Shackle, V.J., Hughes, S. et Lewis, V.T. (1999). The influence of three methods of gravel cleaning on brown trout, *Salmo Trutta*, egg survival. *Hydrological processes* (13). pp :477-486.
- Shields, H.J. (1968). Riffle sifter for alaska salmon gold. Yearbook of agriculture. Seperate No. 3586. pp :204-208.
- Tappel, P.D. et Bjornn, T.C. (1983). A new method of relating size of spawning gravel to salmonid embryo survival. *North American Journal of Fisheries Management* (3). pp. : 123-135.
- Turnpenny, A.W. H. et Williams, R. (1980). Effects of sedimentation on the gravels of an industrial river system. *J. Fish. Biol* (17). pp. : 681-693.
- White, H.C. (1942). Atlantic salmon redds and artificial spawning beds. *Journal Fish. Res. Bd. Can.* (6), no.1. pp. :37-44.
- Wilcock, P.R. (1992). Flow competence : A criticism of a classic concept. *Earth Surf. Processes Landforms* (12). pp. : 289-298.
- Wilcock, P.R., Kondolf, G.M., Barta, A.F., Matthews, W.V.G. et Shea, C.C. (1995). Spawning gravel flushing during trial reservoir releases on the Trinity River : Field observations and recommendations for sediment maintenance flushing flows. Rep. 05-95. Cent. for Environ. Design Res., Univ. of Calif., Berkeley. 222 pages.

Ylkanen, B. (1993). Michigan sand trap program summery. Michigan Department of Natural Resources, Interdepartmental Communication to J. Robertson, Chief, Fisheries Division, 18 Feb. 1993. Lansing.

Zeh, M. et Dönni, W. (1994). Restoration of spawning grounds for trout and grayling in the river High-Rhine. Aquatic Sciences (56), no.1. pp :59-69.

PARTIE 9

Annexes

9.1 Annexe 1 : Calcul de la force tractrice de l'écoulement à partir de la méthode des stress de Reynolds.

Décomposition de la vitesse en 3 composantes vectorielles orthogonales.

$$V = \vec{u} + \vec{v} + \vec{w}$$

- $\vec{u} \rightarrow$ Sens de l'écoulement.
- $\vec{v} \rightarrow$ Vertical de l'écoulement.
- $\vec{w} \rightarrow$ Perpendiculaire à l'écoulement.

Chaque composante peut être décomposée en une valeur moyenne plus une fluctuation autour de cette moyenne.

$$\begin{aligned}\vec{u} &= \bar{u} + u' \\ \vec{v} &= \bar{v} + v' \\ \vec{w} &= \bar{w} + w'\end{aligned}$$

moyenne de la vitesse en u $\rightarrow \bar{u}$
fluctuation de la vitesse autour de la moyenne u $\rightarrow u'$

Force tractrice

$$\tau = -\rho \cdot \overline{u'v'}$$

Calcul de l'énergie turbulente (RMS).

$$RMS = \frac{\sqrt{\frac{1}{3}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})}}{\bar{u}}$$

9.2 Annexe 2 : Techniques d'échantillonnages granulométrique

9.2.1 Cellule d'isolation du courant

La cellule d'isolation permet de prélever un échantillon du substrat tout en minimisant la perte de sédiments fins (figures 33 et 34). En effet, l'arrière de la cellule est muni d'un filet Nytex de 78 microns qui permet de récolter les sédiments fins entraînés par le courant lors de l'excavation (figure 33). L'échantillon est prélevé à l'intérieur de la cellule à l'aide d'une pelle jusqu'à une profondeur d'environ 30 cm. Chaque échantillon ainsi prélevé pèse entre 150 et 200 kilogrammes. Lors de l'échantillonnage, le pavement et le sous-pavement du substrat ont été prélevés séparément. Le pavement correspond à la couche superficielle du lit qui est généralement plus grossière et possède moins de sédiments fins que le sous-pavement.

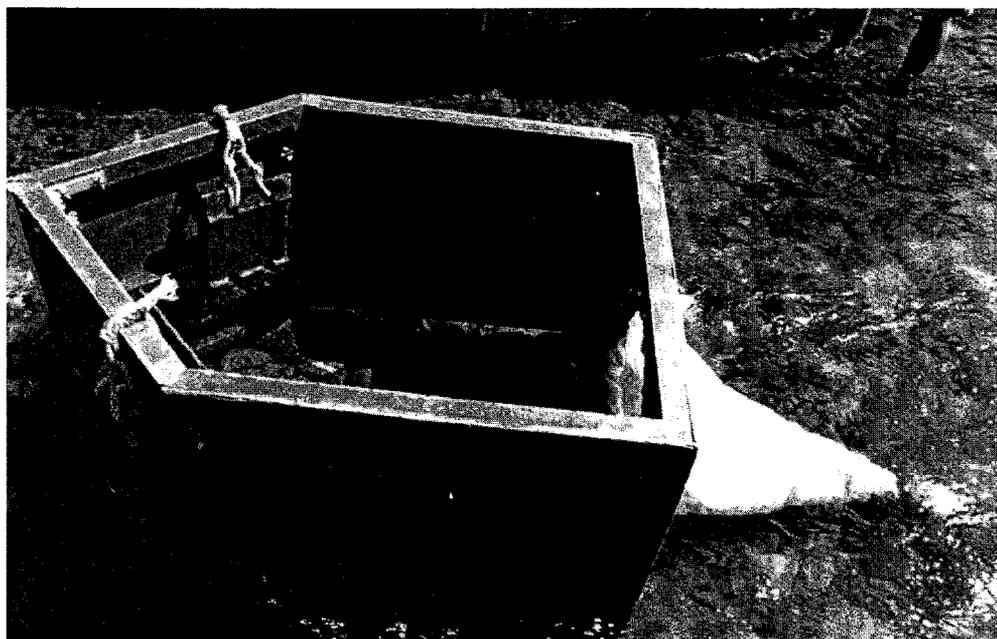


Figure 33. La cellule d'isolation du courant.

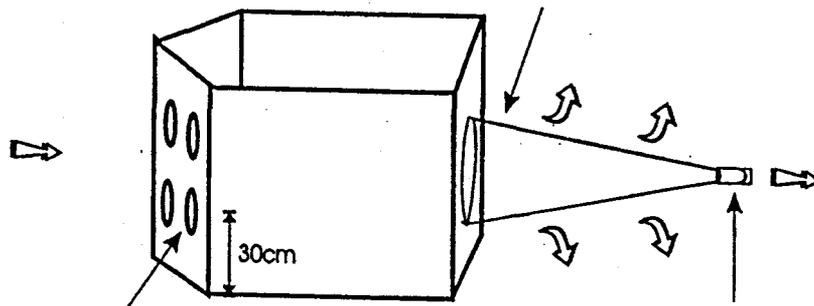


Figure 34. Schéma de la cellule d'isolation du courant.

La cellule permet l'échantillonnage de grandes quantités de sédiments ainsi que de discriminer le pavement du sous-pavement du lit de la rivière.

9.2.2 Mc Neil

Une adaptation de l'échantillonneur McNeil (Schuett Hames *et al.*, 1996) a été utilisée dans le cas où les conditions hydrauliques ne permettaient pas un échantillonnage efficace à l'aide de la cellule d'isolation du courant. Cet appareil est formé d'un cylindre avec lequel il est possible de creuser le lit de la rivière et d'en retirer une certaine quantité de sédiments. L'eau et les sédiments à l'intérieur du cylindre sont alors filtrés par une série de tamis de plus en plus fins. Ce tri, effectué à l'intérieur du cylindre, permet d'évacuer l'eau de l'appareil pour ensuite récolter les sédiments. L'échantillonneur McNeil permet de prélever des échantillons d'environ trois kilogrammes dans le pavement du lit. La figure 35 montre l'utilisation de l'échantillonneur McNeil.



Figure 35. Échantillonnage du substrat avec un appareil McNeil.

9.2.3 Cube

Une nouvelle technique d'échantillonnage du substrat de fraie est ici utilisée. Elle permet de simuler la structure sédimentaire d'un nid de saumon atlantique ainsi que d'échantillonner le substrat à l'intérieur de ce dernier sans perte des sédiments fins.

Le cube d'infiltration découle d'une modification du concept d'échantillonnage présenté par Lisle et Eads (1991). Cette nouvelle méthode permet de récolter facilement et rapidement des échantillons du substrat même sous couvert de glace tout en évitant de perdre les sédiments fins. Le cube d'infiltration est une armature rectangulaire en métal (33 x 33 x 20 cm) caractérisée par un fond grillagé et sans cotés. À chaque cube est associé un sac de caoutchouc souple (profondeur de 40 cm) attaché à un cadre en métal (38 x 40 cm). Deux câbles en acier servant d'amarre sont attachés à ce cadre. Lors de l'installation des cubes, il s'agit de déposer le sac rabattu dans le fond d'un trou creusé dans le substrat (profondeur de 20 cm), d'y déposer le cube et de l'enterrer à la manière qu'une femelle saumon enfouit ses œufs (i.e. utiliser le substrat en amont du trou pour remblayer). Pour enlever le cube du substrat il s'agit de tirer sur les deux câbles à l'aide d'un treuil installé à un trépied. Ainsi, le cadre de métal qui est guidé par le cube entraîne le sac vers la surface. La figure 36 montre une image du cube avec son sac rabaissé. La figure 37 montre le cube une fois installé dans le substrat avant d'être enfouit. La figure 38 illustre une séquence d'images démontrant l'extraction d'un cube installé dans le substrat.

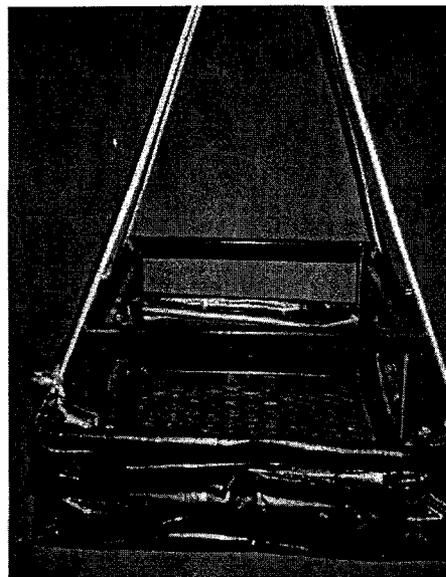


Figure 36. Photo d'un cube : armature de métal et sac.



Figure 37. Photo d'un cube installé dans le substrat.



Figure 38. Séquence d'extraction d'un cube du substrat.

Cette nouvelle méthode d'échantillonnage granulométrique permet d'effectuer des tests d'incubations d'œufs de saumon à l'intérieur des cubes. Lors de la pose, une certaine quantité d'œufs fertilisés peut être déposée au centre des cubes pour être ensuite récupérée lors de l'extraction des cubes. Cet appareil permet donc d'obtenir des taux de survie d'incubation d'œufs de saumon en milieu naturel.