

Université du Québec  
Institut national de la recherche scientifique  
Centre Eau, Terre et Environnement

**SUIVI SPATIO-TEMPOREL ET IMPACTS DE L'INFILTRATION DES  
SÉDIMENTS FINS DANS LES FRAYÈRES DE SAUMON ATLANTIQUE**

Par

Mylène Levasseur

Thèse présentée  
pour l'obtention du grade de Philosophiae doctor (Ph.D.)  
en Sciences de la terre

Jury d'évaluation

Président du jury  
et examinateur interne

Dr Richard Martel  
INRS-ETE

Examineurs externes

Pierre Bérubé  
FAPAQ

Dr André Plamondon  
Université Laval

Directeur de recherche

Dr Normand Bergeron  
INRS-ETE

Codirecteur de recherche

Dr Michel Lapointe  
Université McGill

Janvier 2008

© Droits réservés de Mylène Levasseur



*À mes parents,*



*Le succès n'est pas une finalité en soi et les défaites ne sont pas fatales,  
c'est le courage de continuer qui importe.*

Sir Winston Churchill



## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes différents partenaires financiers, soit le Fonds des Priorités Gouvernementales en Sciences et en Technologie (FPGST-E), le Conseil de la Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) ainsi que le Centre Interuniversitaire de Recherche sur le Saumon Atlantique (CIRSA).

J'adresse un merci particulier à mon directeur de recherche, Normand Bergeron, pour sa présence incomparable tout au long de ces nombreuses années, mais aussi pour son amitié et son éternelle compréhension. Je voudrais aussi remercier mon co-directeur, Michel Lapointe, pour nos discussions géomorphologiques toujours aussi essentielles et intéressantes. Un merci tout spécial pour mon grand-ami-plus-que-collègue-de-travail, FrancisTheFreak, pour tout ce qu'il a pu faire pour moi, tout au long de ce cheminement et dont je n'aurai probablement pas assez d'une vie pour le remercier.

Merci à plusieurs personnes du labo Bergeron et du CIRSA pour leur aide sur le terrain, au laboratoire et lors des discussions et interrogations interminables lors du traitement et de l'analyse des données. Je pense, en particulier, à Annie Ménard, Patricia Johnston, Giselle Wagner, Julie Smith, Marc-André Pouliot, André alias Mononke et SisterVé.

Merci aussi à mes amis de ma ville d'adoption, QuébecLaCity, qui me sont indispensables et qui ont su accepter mes éternels retards et mes horaires toujours trop chargés et compliqués. Je pense ici à GizWiz, Pat alias Môman, Madame B., PetiteClo et tout récemment Chantal, à qui j'adresse un merci tout particulier pour sa précieuse aide lors de l'édition finale de la thèse. D'ailleurs, merci aussi à mes lutins préférés, qui sauront se reconnaître, pour leur aide lors du sprint final du dépôt initial.

Je voudrais remercier plus particulièrement certaines personnes qui traînent dans ma vie depuis longtemps, pour mon plus grand bonheur. Il s'agit de Dioubiouc, Naaadia, Célin, ChantalEx-colocAdorée, mes cousins, mes tantes De et C'line ainsi que mon

P'titMononkeGeorges. Merci pour leur patience, leur amour/amitié inconditionnelle et leur immense compréhension. J'espère secrètement qu'ils en viendront tout simplement à oublier mes nombreuses absences, autant de corps que d'esprit, durant toutes ces années. Je vous adore!

Enfin, le dernier remerciement et non le moindre, c'est celui que j'offre inconditionnellement à mes parents et ce, avec tout l'amour et le respect que je leur porte. En fait, je leur dédis cette thèse, car ils font parti des rares personnes qui savent à quel point je me suis impliquée intensément afin d'accomplir ce doctorat. Durant ces années, j'ai donné :

- un peu de mon corps (une partie de mon dos, entre L4 et L5, y est même restée);
- énormément de mon esprit;
- et plus que je l'avais imaginé, de mon âme, de mon cœur et de mes trippes.

Merci donc, à mes parents, pour l'éternelle confiance qu'ils ont en moi, pour le respect sincère de mes choix, pour leurs encouragements constants et leur support sans faille et encore jamais égalé et aussi, pour leur grande disponibilité. Bref, merci d'avoir toujours été là pour moi. J'en suis très reconnaissante et c'est plus qu'apprécié.

Enfin, pour toutes ces raisons, voilà pourquoi je leur offre avec fierté cette thèse, preuve concrète et tangible d'un simple accomplissement qui m'a permis d'apprendre bien au-delà des aspects académiques.

Après tout, comme une rivière, les méandres de la vie sont en constante évolution pour tenter, encore et toujours, d'atteindre un certain équilibre!

## Résumé

La présence excessive de sédiments fins dans le substrat de fraie de saumon atlantique est un facteur important qui limite le succès de reproduction de cette espèce de plus en plus vulnérable. Ces sédiments peuvent nuire autant aux embryons lors des différents stades de développement qu'aux alevins lors de l'émergence. Étant donné que la femelle diminue la quantité de sédiments fins présents dans le substrat lors de la construction du nid, les œufs sont déposés dans un environnement relativement exempt de ce type de sédiments. Par conséquent, l'effet néfaste des sédiments fins sur la survie des embryons dépendrait de la quantité de sédiments fins s'infiltrant dans le nid sur l'ensemble de la période d'incubation. Il n'existe actuellement aucune étude ayant déterminé à quels moments se produisent les événements d'infiltration de ces sédiments dans les nids de saumon atlantique. L'absence d'outils de mesure appropriés explique en partie le manque flagrant de connaissances à ce sujet. Pour remédier à ce problème, nous avons développé une nouvelle technique d'échantillonnage qui permet de documenter en simultanément l'infiltration des sédiments fins ainsi que la survie des embryons dans un environnement qui reproduit un nid naturel de saumon et ce, à différents moments durant la période d'incubation. Nous avons ensuite testé l'efficacité de cette nouvelle technique en milieu naturel. Les résultats ont démontré que la technique était efficace pour l'échantillonnage en simultanément des deux variables et qu'elle permettait aussi de reproduire adéquatement les caractéristiques physiques d'un nid naturel de saumon.

Cette nouvelle technique d'échantillonnage nous a ensuite permis d'effectuer un suivi de l'infiltration des sédiments fins dans des nids artificiels de saumon atlantique durant l'incubation et aussi d'en évaluer l'impact sur la survie des embryons. L'objectif était de combler le manque de connaissances concernant les moments spécifiques durant lesquels se produisent les événements d'infiltration majeurs lors de l'incubation. Les résultats ont démontré qu'il y avait une relation négative et significative entre le pourcentage de survie à l'éclosion et les deux fractions de sédiments les plus fins analysés, soit les silts et les sables très fins et que l'infiltration de ces sédiments s'effectuait plus particulièrement

pendant la période hivernale. Par contre, nos résultats ont aussi démontré que lors de la crue printanière, il y avait aussi de l'infiltration de sédiments fins dans le substrat, mais que cette dynamique était beaucoup plus complexe que lors de la période hivernale. Dans certaines zones des sites d'étude, la crue permettait de purger considérablement le substrat d'une certaine quantité de sable très fin et de silt, tandis que dans d'autres zones, elle favorisait l'infiltration. Ce résultat illustre l'importance de considérer la variabilité spatiale pour une meilleure compréhension de la dynamique temporelle de l'infiltration de sédiments fins dans le substrat de fraie de saumon atlantique lors de la période d'incubation.

Une meilleure connaissance de la dynamique temporelle et spatiale de l'infiltration de sédiments fins est essentielle, car elle permet, entre autres, d'agir de façon plus efficace lors d'interventions de nettoyage du substrat de fraie. Ce type d'opération est souvent effectué par les gestionnaires de rivières qui tentent d'améliorer la qualité des sites de fraie pour favoriser la reproduction de l'espèce. Des problèmes importants sont encore bien réels concernant les nombreuses techniques de nettoyage existantes. La majorité d'entre elles sont souvent très complexes et coûteuses, elles nécessitent généralement l'usage d'une énergie supplémentaire et/ou d'une main-d'œuvre importante pour fonctionner. Nous avons donc développé et testé une nouvelle technique de nettoyage qui ne possédait pas ces inconvénients. Cette dernière est compacte, peu onéreuse et simple à utiliser. De plus, elle ne nécessite aucune source d'énergie supplémentaire pour fonctionner, autre que la force de l'écoulement pour nettoyer convenablement le substrat de fraie. Les résultats des essais en milieu naturel ont visiblement démontré l'efficacité de l'appareil par la diminution du pourcentage de sédiments fins dans le substrat pour des zones nettoyées comparées à des zones témoins. Par contre, les résultats ont aussi mis en évidence l'importance des conditions d'écoulement, car étant donné que notre technique est hydromotrice, ces dernières sont déterminantes pour que l'appareil puisse nettoyer efficacement. Il est donc suggéré d'effectuer d'autres tests afin de déterminer les limites d'applicabilité et d'efficacité de cette nouvelle technique de nettoyage prometteuse.

L'ensemble de ces résultats, qui constitue le cœur de la thèse, permet de remédier à certaines lacunes sur le plan théorique, technique et méthodologique concernant la dynamique de l'infiltration des sédiments fins lors de la période d'incubation et de leurs impacts sur la survie des embryons de saumon atlantique.

Par ailleurs, puisque les résultats d'une étude récente menée en laboratoire suggéraient que le taux de survie des embryons de saumon atlantique était influencé non seulement par la composition du substrat (i.e. teneur en sédiments fins), mais par la combinaison de cette variable à celle de la valeur du gradient hydraulique (Lapointe *et al.*, 2004), nous avons voulu vérifier cette hypothèse encore jamais examinée en milieu naturel.

Étant donné que la survie des embryons dépend des caractéristiques de l'écoulement intergranulaire, nos objectifs étaient d'évaluer le rôle du gradient hydraulique sur la vitesse de l'écoulement intergranulaire et d'autre part, de déterminer l'importance relative d'autres variables pouvant aussi modifier la vitesse de cet écoulement, comme par exemple, la porosité du substrat, sa perméabilité ainsi que le pourcentage de sédiments fins. Ces variables ont été échantillonnées dans une gamme de conditions différentes sur une quinzaine de sites potentiels de fraie. Les résultats n'ont indiqué aucune relation significative entre la vitesse de l'écoulement intergranulaire et les différentes variables du substrat et du gradient hydraulique. Par ailleurs, plusieurs limitations liées à l'échantillonnage peuvent avoir affecté la qualité des données récoltées ainsi que les analyses qui en découlent. Il est d'ailleurs recommandé de procéder à nouveau à l'échantillonnage, en remédiant aux différentes lacunes soulevées. Malgré l'aspect préliminaire de ces résultats, ils constituent tout de même de nouvelles pistes de recherche pour mieux comprendre les différentes variables qui peuvent modifier l'environnement intragravier dans lequel se développe les embryons de saumon.

L'intention générale de cette thèse était d'améliorer l'état des connaissances concernant l'habitat de reproduction de cette espèce pour ainsi tenter à plus ou moins long terme d'améliorer l'état des populations qui ne cessent de diminuer.



## TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
Remerciements.....	vii
Résumé.....	ix
Table des matières.....	xiii
Liste des tableaux.....	xix
Liste des figures .....	xxi
Liste des annexes .....	xxv
INTRODUCTION .....	1
<i>Salmo salar</i> : Une espèce en déclin.....	1
Un manque d'outils et de connaissances .....	2
Nettoyage des sites de fraie .....	4
Objectifs de recherche .....	5
Subdivision de la thèse .....	6
CHAPITRE 1 Généralités sur la reproduction du saumon atlantique et sur l'infiltration des sédiments fins dans le substrat de fraie.....	9
1.1 Facteurs affectant la survie des embryons de saumon atlantique lors de la période d'incubation .....	9
1.1.1 Notions de base sur la reproduction du saumon atlantique.....	9
1.1.2 Importance de l'oxygène dissous pour le développement des embryons .....	12
1.1.3 Importance de l'écoulement intergranulaire à l'échelle du nid et du site de fraie .....	13
1.1.4 Impacts négatifs des sédiments fins sur la survie des embryons .....	17
1.2 Dynamique du transport et de l'infiltration des sédiments fins lors de l'incubation .....	22
1.2.1 Sources des sédiments fins.....	22
1.2.2 Types de transport de sédiments .....	22
1.2.3 Caractéristiques des graviers alluviaux.....	23
1.2.4 Processus d'infiltration des sédiments fins dans le substrat.....	25

**TABLE DES MATIÈRES (suite)**

	<i>Page</i>
1.2.4.1 Effets des crues sur l'infiltration des sédiments fins dans le substrat.....	26
1.2.4.2 Effets du couvert de glace sur l'infiltration des sédiments fins dans le substrat.....	27
1.3 Conclusion : lacunes des études portant sur l'infiltration des sédiments fins dans les nids de saumon et impacts sur la survie .....	28
 CHAPITRE 2 Revue des techniques d'échantillonnage du substrat et de la survie des embryons .....	 31
2.1 Techniques d'échantillonnage pour estimer la survie .....	31
2.2 Techniques d'échantillonnage du substrat .....	33
2.3 Utilisation de plusieurs techniques pour déterminer l'impact des sédiments fins sur la survie .....	37
2.4 Conclusion et nécessité d'amélioration.....	38
 CHAPITRE 3 Revue des techniques de nettoyage du substrat.....	 39
3.1 Réduction à la source de l'apport de sédiments fins .....	39
3.2 Scarification .....	40
3.3 Riffle sifter .....	42
3.4 Jet à pression d'un mélange d'air et d'eau (Air-water jet).....	43
3.5 Curage : action combinée de deux jets d'eau perpendiculaires .....	44
3.6 Flushing flow.....	45
3.7 Déflecteur-barrière (Baffle gate).....	47
3.8 Trappes à sédiments .....	47
3.9 Augmentation de la pente pour améliorer un site de fraie .....	48
3.10 Seuils et déflecteurs.....	49
3.11 Remplacement du gravier de frayères par ajout de graviers nettoyés.....	52
3.12 Exemples de la combinaison de plusieurs techniques.....	55
3.13 Conclusion, lacunes et nécessité d'amélioration.....	57
 RÉFÉRENCES.....	 59

## TABLE DES MATIÈRES (suite)

	<i>Page</i>
CHAPITRE 4 Contribution de la thèse.....	71
4.1 Contribution de la candidate .....	71
4.2 Contribution du chapitre 5 .....	71
4.3 Contribution du chapitre 6 .....	74
4.4 Contribution du chapitre 7 .....	77
4.5 Contribution du chapitre 8 .....	80
CHAPITRE 5 A field method for the concurrent measurement of fine sediment content and embryo survival in artificial salmonid redds.....	85
Résumé .....	87
Abstract .....	88
Introduction .....	89
Description of the method .....	90
Comparison between artificial and natural salmonid redds .....	92
Field survey to test the efficiency of the new method.....	93
Study sites .....	93
Method .....	93
Results and discussion .....	94
<i>Infiltration cube retrieval and sediment sample characteristics</i> .....	94
<i>Embryo recovery success and hatching survival</i> .....	95
Acknowledgements .....	96
References .....	97
CHAPITRE 6 Spatio-temporal patterns of silt and fine sand infiltration into spawning redds and their importance to salmon embryo survival in the Sainte-Marguerite River, Saguenay Region, Quebec .....	105
Résumé .....	107
Abstract .....	108
Introduction .....	109
Study sites.....	111
Methods .....	113

**TABLE DES MATIÈRES (suite)**

	<i>Page</i>
Infiltration-incubation sampling cubes design .....	113
Spatial and temporal sampling design.....	114
Bedload traps.....	115
Grain size analysis.....	116
Embryo survival .....	116
Results .....	117
Seasonal characteristics and recovery success .....	117
Effects of different fine sediment fractions on embryo survival to hatching	119
Seasonal evolution of fine sediment content at the patch scale .....	120
Discussion.....	124
Effects of silt and very fine sand fractions on embryo survival.....	124
Spatial and temporal controls on infiltration and flushing of silts and very fine sands .....	125
Acknowledgements.....	126
References.....	127
 CHAPITRE 7 Démonstration de l'efficacité d'une nouvelle technique de nettoyage pour diminuer la quantité de sédiments fins dans le substrat des frayères de salmonidés .....	 145
Résumé .....	147
Introduction.....	148
Méthodologie.....	150
Description de la technique de nettoyage.....	150
Description des sites d'essais et du plan d'échantillonnage.....	152
Résultats.....	153
Discussion.....	155
Conclusion.....	157
Remerciements .....	158
Références.....	159

## TABLE DES MATIÈRES (suite)

	<i>Page</i>
CHAPITRE 8 Évaluation de l'importance relative du gradient hydraulique et des caractéristiques du substrat sur la vitesse de l'écoulement intergranulaire en milieu naturel .....	169
8.1 Contexte .....	169
8.2 Élaboration d'une méthode pour déterminer la vitesse de l'écoulement intergranulaire .....	170
8.2.1 Introduction .....	170
8.2.2 Méthodologie .....	171
8.2.3 Résultats .....	173
8.2.4 Discussion .....	175
8.3 Évaluation de l'importance relative du gradient hydraulique et des caractéristiques du substrat sur la vitesse intergranulaire en milieu naturel ..	176
8.3.1 Introduction .....	176
8.3.2 Méthodologie .....	177
8.3.2.1 Travaux au terrain .....	177
8.3.2.2 Traitement et analyses .....	178
8.3.3 Résultats .....	181
8.3.4 Discussion .....	181
8.4 Conclusion .....	184
Références .....	187
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	203
Recommandations et travaux futurs .....	206



## LISTE DES TABLEAUX

	<i>Page</i>
Tableau 1.1	Classification de Wentworth des sédiments en relation avec la taille des grains (Tirée de Leeder, 1982)..... 19
Tableau 1.2	Définitions et règles de décision des différents indices de la qualité du substrat. .... 20
Tableau 5.1	Mean, standard deviation (sd) and coefficient of variation (CV=(sd/mean)*100) of embryo survival for each spawning site. .... 100
Tableau 6.1	Physical characteristics for each site sampled after the spawning period in both years. .... 130
Tableau 6.2	Statistics of the relative variability in the different fine sediment fractions within the entire data set. .... 131
Tableau 6.3	Coefficient of variation (CV) of the temporal variation for each fine sediment fractions for the two sites and the two years of sampling. .... 132
Tableau 7.1	Caractéristiques générales des frayères à l'étude sur la branche principale de la rivière Ste-Marguerite. .... 163
Tableau 7.2	Moyenne (écart-type) des différentes classes de sédiments fins et des indices (FI, SI et %<2 mm) pour les zones témoins et les zones nettoyées des deux sites et impact du nouvel appareil exprimé en % de nettoyage. .... 164
Tableau 8.1	Vitesses intergranulaires estimées à partir du temps écoulé pour atteindre la valeur maximale de concentration du traceur de chaque essai et vitesses réelles calculées à partir du débit intergranulaire. .... 188
Tableau 8.2	Paramètres des essais de traçage de sel et vitesse réelle calculée à partir du débit intergranulaire. .... 189
Tableau 8.3	Valeurs du coefficient d'asymétrie des courbes résultantes des essais de traçage de sel menés en milieu contrôlé et en milieu naturel..... 190

**LISTE DES TABLEAUX (suite)**

	<i>Page</i>
Tableau 8.4 Conditions d'échantillonnage des seuils à l'étude. ....	191
Tableau 8.5 Résultats des corrélations simples entre la vitesse intergranulaire et les variables du gradient hydraulique et des caractéristiques du substrat.....	192
Tableau 8.6 Valeurs du nombre de Reynolds de l'écoulement intergranulaire des seuils étudiés. ....	193

## LISTE DES FIGURES

	<i>Page</i>
Figure 1.1	Architecture longitudinale et verticale d'un nid typique de saumon (Tirée de Kennie et Millar, 2000). ..... 10
Figure 1.2	Stades de développement des embryons de salmonidés lors de l'incubation. .... 11
Figure 1.3	Loi de Darcy en relation avec le patron de l'écoulement intergranulaire à travers un nid (Tirée de Kondolf, 2000). .... 14
Figure 1.4	Profil caractéristique seuil-mouille en relation avec une variation du débit (Tirée de Petts et Calow, 1996)..... 15
Figure 1.5	Patron d'écoulement en relation avec la topographie du lit, similaire à un nid de saumon qui vient d'être creusé (Tirée de Cooper, 1965). ..... 16
Figure 1.6	Structures du lit des graviers alluviaux (Tirée de Church <i>et al.</i> , 1987) A) Typique: Pavement, sous-pavement et lit de base B) Plus de 30% de sédiments fins..... 24
Figure 1.7	Distributions granulométriques des graviers alluviaux de subsurface A) Bimodale et B) Unimodale (Tirée de Church <i>et al.</i> , 1987)..... 24
Figure 1.8	Effet du couvert de glace sur la vitesse (V) et la profondeur (D) à débit constant (Modifiée de Beltaos <i>et al.</i> , 1993). .... 27
Figure 2.1	A) Trappe d'émergence (Source: Royal British Columbia Museum) B) Boîtes de Whithlock-Vibert modifiées ..... 32
Figure 2.2	A) Trappe à sédiments B) Sédibac (Source : Bio Innove Inc.)..... 34
Figure 2.3	Technique du Freeze core (Tirée de Petts <i>et al.</i> , 1989)..... 35
Figure 2.4	Cellule d'isolation du courant..... 36

**LISTE DES FIGURES (suite)**

	<i>Page</i>
Figure 2.5	Sac d'infiltration (Tirée de Lisle et Eads, 1991). ..... 37
Figure 3.1	Riffle sifter (Tirée de Shields, 1968). ..... 42
Figure 3.2	Création de sites de fraie au moyen de barrage (Tirée de Hermansen et Krog, 1985). ..... 49
Figure 3.3	Site de fraie artificiel avec mini-défecteur de pierres en V (Tirée de White, 1942). ..... 51
Figure 3.4	Seuils retenant le gravier ajouté (Tirée de Hutchinson et Taylor, 1988). . 53
Figure 3.5	Plan du site du projet de restauration de la Merced River, Californie.. .... 54
Figure 3.6	Localisation des seuils et trappes à sédiments sur les trois sites à l'étude (Tirée de Avery, 1996). ..... 56
Figure 3.7	Site de fraie artificiel typique, Gotland (Suède) (Tirée de Rubin <i>et al.</i> , 2004). ..... 57
Figure 5.1	Infiltration cube. .... 101
Figure 5.2	Infiltration cube with eggs embedded in a morpho-sedimentological unit similar to a natural salmon redd. .... 102
Figure 5.3	Infiltration cube extracted during the late winter period. .... 103
Figure 5.4	Difference in percentage of fine sediment (< 1 mm) between surrounding gravel and infiltration cube substrate samples on a spawning site of the Sainte-Marguerite River. .... 104

**LISTE DES FIGURES (suite)**

	<i>Page</i>
Figure 6.1	High altitude airborne photography of the two study sites. A) Glass Pool B) Bras des murailles..... 133
Figure 6.2	A) Infiltration cube B) Infiltration cube extracted during the late winter period. .... 134
Figure 6.3	Spatial location of the different patches for the two sampling year on A) Glass Pool site B) Bras des Murailles..... 135
Figure 6.4	Typical patch with location of infiltration cubes and sediment traps. .... 137
Figure 6.5	Daily discharge (Q) during the incubation period from a regional gauge (#062803, NE Ste-Marguerite River)..... 138
Figure 6.6	Relationship between A) Sand Index and % survival and B) %<2mm and % survival..... 139
Figure 6.7	Relationship between % of SVFS in artificial redds and % survival. .... 140
Figure 6.8	Temporal variations of infiltration and flushing of SVFS during the incubation period for both sites and sampling years..... 141
Figure 6.9	Temporal variations of Dmax of the sediment traps during the incubation period. .... 142
Figure 6.10	Relationship between infiltration and flushing of % SVFS and sediment trap Dmax of both sites and years of sampling for all the sampling periods..... 143
Figure 6.11	Temporel variation of SVFS content at each sampling period for both sites and sampling years..... 144
Figure 7.1	A) Photos de la base-griffée utilisée pour démobiliser le substrat B) Photo du traîneau-déflateur. .... 165

**LISTE DES FIGURES (suite)**

	<i>Page</i>
Figure 7.2	Plan d'échantillonnage sur un site d'étude..... 166
Figure 7.3	Relation entre les zones témoins et les zones nettoyées du % des différentes classes de sédiments fins..... 167
Figure 8.1	Illustration schématique de l'impact d'une augmentation du niveau d'eau sur le gradient hydraulique..... 194
Figure 8.2	Chenal expérimental..... 195
Figure 8.3	Détermination du gradient hydraulique en conditions contrôlées..... 196
Figure 8.4	Design expérimental pour l'échantillonnage de la vitesse intergranulaire par traçage de sel. .... 197
Figure 8.5	Relation linéaire entre le gradient hydraulique et la vitesse intergranulaire réelle calculée à partir du débit intergranulaire pour les six conditions d'échantillonnage menées en milieu contrôlé. .... 198
Figure 8.6	Courbes résultantes des essais de traçage de sel menés en conditions contrôlées.. .... 199
Figure 8.7	A) Courbe typique d'un essai de traçage de sel. B) Paramétrisation d'une courbe typique d'un des essais de traçage..... 200
Figure 8.8	Exemples des courbes résultantes des essais de traçage de sel menés en milieu naturel..... 201

**LISTE DES ANNEXES**

- Annexe 1 Complément au chapitre 7 concernant le développement d'une nouvelle technique de nettoyage du substrat : Effets du déflecteur sur les caractéristiques de l'écoulement



## INTRODUCTION

---

### ***Salmo salar* : Une espèce en déclin**

La pêche sportive du saumon atlantique (*Salmo salar*) procure des retombées économiques évaluées à près de 100 million de dollars par année pour les provinces de l'est du Canada. Par exemple en 2001, la FAPAQ a estimé des retombées de 42,9 million de dollars seulement pour la province de Québec ([www.comission-foret.qc.ca/memoires](http://www.comission-foret.qc.ca/memoires)). Toutefois, l'espèce est en déclin un peu partout dans le monde où l'on constate que les stocks ont diminué de près de 50 % depuis les 20 dernières années (Parrish *et al.*, 1998). D'après Armstrong *et al.* (2003), une des causes importantes de ce déclin serait liée à la dégradation des habitats en rivière. La reproduction du saumon, qui représente la base de son cycle de vie, s'effectue en rivière. Dans ce contexte, il est important de mieux connaître les facteurs qui limitent le succès de la reproduction afin de proposer des mesures qui permettront d'accroître la production de saumon en milieu naturel.

La reproduction du saumon se produit à l'automne (Bernatchez et Giroux, 1991) au terme de la migration des saumons géniteurs qui ont quitté l'océan pour venir frayer dans leur rivière natale. La femelle creuse un trou dans le substrat de la frayère, y dépose ses oeufs, puis les recouvre d'une couche de gravier après qu'ils aient été fertilisés par le mâle (Scott et Crossman, 1974). La période d'incubation s'étend sur plusieurs mois. Les oeufs restent enfouis dans le nid pendant tout l'hiver et à la fin du printemps suivant, les alevins émergent du substrat (Bernatchez et Giroux, 1991). Il est reconnu que la présence excessive de sédiments fins dans le substrat de fraie représente un des facteurs principaux qui affecte la survie des embryons lors de la période d'incubation (Chapman, 1988; Kondolf, 2000). Les sédiments fins diminuent l'écoulement intergranulaire (Everest *et al.*, 1987; Argent et Flebbe, 1999) qui permet d'approvisionner les oeufs en oxygène et d'évacuer hors du nid les déchets métaboliques toxiques produits par les embryons lors de leur développement (Beschta et Jackson, 1979). De plus, les sédiments fins

obstruent les pores du substrat et bloquent ainsi parfois le déplacement des alevins qui tentent d'émerger suite à l'éclosion (Chapman, 1988). Ces derniers demeurent donc emprisonnés dans le gravier.

Il a cependant été démontré que la femelle modifie la composition du substrat de fraie lors de la construction du nid. Indépendamment du contenu initial en sédiments fins, le processus de creusage et de remplissage du nid a pour effet de diminuer considérablement la quantité de sédiments fins présents dans ce dernier (Lisle et Lewis, 1992; Montgomery *et al.*, 1996). Ceci crée donc des conditions initiales favorables qui assurent un bon écoulement intergranulaire dans le nid et une bonne oxygénation des embryons (Everest *et al.*, 1987; Kondolf *et al.*, 1993). Par conséquent, l'effet néfaste des sédiments fins sur la survie des embryons dépendrait plus de la quantité de sédiments fins s'infiltrant dans le nid durant la période d'incubation que de la quantité de sédiments fins présents dans le substrat immédiatement avant ou après la reproduction (Lisle, 1989; Acornley et Sear, 1999). Ainsi, l'évaluation de la qualité du substrat de fraie ne devrait pas être basée sur une seule période d'échantillonnage, ni non plus seulement en périphérie des nids comme la littérature en fait largement état (Frostick *et al.*, 1984; O'Connor et Andrew, 1998; Rhodes et Purser, 1998; Soulsby *et al.*, 2001). Il devrait plutôt être effectué à l'intérieur des nids et ce, à plusieurs moments pendant la totalité de la période d'incubation.

### **Un manque d'outils et de connaissances**

Bien que différentes méthodes aient été développées pour mesurer la survie des embryons (MacKenzie et Moring, 1988; Reiser et White, 1988; Weaver et Fraley, 1993) ou l'infiltration des sédiments fins dans le substrat (Wesche *et al.*, 1989; Lisle et Eads, 1991; Lachance et Dubé, 2004), aucune d'entre elles ne permet de mesurer simultanément la survie des embryons et le contenu en sédiments fins dans un environnement reproduisant adéquatement un nid naturel de saumon.

Un nid naturel possède une morphologie et une granulométrie différentes du lit qui l'entoure. Il est caractérisé par une dépression dans la partie amont et d'un monticule dans la partie aval (Rennie et Millar, 2000). Les sédiments qui le composent sont plus grossiers, créant ainsi des pores plus larges que ceux caractérisant le substrat environnant (Montgomery *et al.*, 1996). De ce fait, les processus d'écoulement intergranulaire et de sédimentation à l'intérieur du nid ne sont pas les mêmes que ceux qui se produisent dans le substrat hors du nid. C'est pourquoi il est nécessaire de développer une méthode permettant de mesurer simultanément le contenu en sédiments fins et la survie des embryons et ce, à l'intérieur d'un nid artificiel possédant les mêmes caractéristiques morphologiques et sédimentologiques qu'un nid naturel de saumon atlantique. Il est aussi primordial que la nouvelle méthode puisse permettre l'échantillonnage à différents moments entre la construction des nids artificiels et l'émergence des alevins, étant donné que les caractéristiques de l'écoulement et des événements de transport d'une rivière contrôlent la quantité ainsi que les moments d'infiltration des sédiments fins dans les nids lors de la période d'incubation.

L'absence d'outils de mesure appropriés explique le manque flagrant de connaissances concernant la dynamique spatiale et temporelle des sédiments fins dans les nids de saumon pendant la période d'incubation. En effet, il n'existe actuellement aucune étude ayant déterminé à quels moments lors de la période d'incubation se produisent les événements d'infiltration et/ou de nettoyage des sédiments fins dans les nids et aussi quels sont les environnements géomorphologiques qui affectent l'infiltration et le nettoyage. De plus, en raison de la difficulté à échantillonner les sédiments de la taille des silts et des sables très fins dans les nids naturels, il n'existe actuellement que peu de connaissances concernant leur effet potentiel sur la survie des embryons. Pourtant, des travaux de laboratoire récents suggèrent que les sédiments de cette taille pourraient jouer un rôle déterminant dans la survie des embryons (Bergeron *et al.*, 2002; Lapointe *et al.*, 2004).

D'ailleurs, l'étude de Lapointe *et al.* (2004) propose aussi de tenir compte de variables autre que la teneur en sédiments fins dans le substrat de fraie pouvant affecter la survie. Les résultats indiquent entre autre que l'augmentation du gradient hydraulique augmente le taux de survie des embryons de saumon, mais que l'ampleur de l'effet dépend de la combinaison de la valeur du gradient hydraulique et de la composition exacte du substrat, particulièrement la teneur en sédiments fins (Lapointe *et al.*, 2004). L'importance du gradient hydraulique n'a encore jamais été vérifiée en milieu naturel, ni non plus la relation entre cette variable et l'état de la qualité du substrat d'un site de fraie. Il est important de remédier à cette lacune, afin de mieux comprendre ce qui peut modifier l'environnement intragravier dans lequel se développe les embryons.

### **Nettoyage des sites de fraie**

Depuis les trente dernières années, plusieurs techniques de nettoyage ont été développées (Andrew, 1974; Mih, 1978; Hansen *et al.*, 1982; Hermansen et Krog, 1985; Ylkanen, 1993, Avery, 1996; Kondolf *et al.*, 1996; Acornley et Sear, 1999; Shackle *et al.*, 1999) et utilisées par les gestionnaires de rivières dans le but de diminuer la quantité de sédiments fins dans le substrat de fraie des salmonidés afin d'améliorer la survie. Les trappes à sédiments (Ylkanen, 1993; Avery, 1996), les seuils et déflecteurs (White, 1942; Rubin *et al.*, 2004), la scarification (Acornley et Sear, 1999), l'injection à pression d'air et/ou d'eau dans le substrat (Mih, 1978; Acornley et Sear, 1999; Shackle *et al.*, 1999) ne sont que quelques exemples de ces techniques de nettoyage. Ces techniques sont cependant généralement complexes et très coûteuses. Ainsi, malgré les effets nocifs des sédiments fins sur la production du saumon atlantique, très peu de techniques simples sont actuellement disponibles afin d'évacuer efficacement les sédiments fins présents dans le substrat des frayères. De plus, la littérature fait état de plusieurs projets de nettoyage de frayères qui ont échoué (Hermansen et Krog, 1985; Kondolf *et al.*, 1996) à cause d'un manque de suivi et/ou d'entretien des sites et structures, mais surtout en raison d'un manque de compréhension des processus géomorphologiques et hydrauliques des rivières

concernées. Bref, il est nécessaire de remédier à ces lacunes pour améliorer l'habitat physique de fraie du saumon atlantique dans le but d'augmenter à long terme les populations de cette espèce qui est de plus en plus vulnérable.

### **Objectifs de recherche**

Quatre objectifs spécifiques sont visés dans cette thèse. Le premier objectif est de développer et de tester une nouvelle technique qui permet l'échantillonnage en simultané des sédiments fins présents dans le substrat de fraie ainsi que la survie des embryons de saumon atlantique. Cette technique doit reproduire le plus fidèlement possible les caractéristiques morpho-sédimentologiques d'un nid naturel de saumon, étant donné que le substrat en périphérie d'un nid naturel ne possède pas les mêmes caractéristiques physiques à la fois au niveau de la composition granulométrique que des conditions d'écoulement intergranulaire qui y prévalent.

Cette nouvelle technique sera ensuite utilisée pour atteindre le second objectif de recherche qui consiste à déterminer la variation temporelle et spatiale de l'infiltration de sédiments fins dans le substrat de fraie du saumon atlantique et ce, à différents moments tout au long de la période d'incubation. L'atteinte de cet objectif devrait permettre de répondre à quelques questions fondamentales, soit à quels moments pendant la période d'incubation se produisent les événements d'infiltration majeurs? Quel en est l'impact sur la survie des embryons de saumon atlantique? Quels endroits sur une frayère sont les plus susceptibles d'être affectés par un taux élevé d'infiltration de sédiments fins pendant la période d'incubation?

Le troisième objectif de cette thèse consiste à concevoir et déterminer l'efficacité d'une nouvelle technique de nettoyage qui permettrait d'évacuer et de récupérer les sédiments fins présents dans le substrat de fraie afin d'en assurer la qualité pour la reproduction.

Cette technique doit être efficace, simple et aussi peu coûteuse, afin qu'elle soit accessible et intéressante pour les utilisateurs potentiels, entre autres, les gestionnaires de rivières. L'atteinte de cet objectif pourra permettre d'améliorer l'habitat physique de fraie du saumon atlantique sur plusieurs rivières et ainsi favoriser la reproduction des populations sauvages.

Le dernier objectif de cette thèse est de vérifier le rôle probable, mais encore jamais quantifié en milieu naturel, du gradient hydraulique sur l'environnement intragravier dans lequel se développe les embryons, en tenant compte d'une éventuelle relation entre cette variable et l'état de la qualité du substrat, particulièrement la teneur en sédiments fins. Advenant la démonstration de l'importance du gradient hydraulique, l'analyse de la qualité d'un site de fraie qui s'effectue habituellement par l'analyse d'une seule variable soit, l'état du substrat, pourrait être améliorée par l'ajout de la caractérisation du gradient hydraulique.

### **Subdivision de la thèse**

Cette thèse comporte huit chapitres. Tout d'abord, les trois premiers chapitres exposent le contexte de la recherche par une revue de la littérature dont le but est de présenter les principales études effectuées antérieurement sur le sujet, mais aussi afin d'exposer les principales lacunes présentes. Le premier chapitre porte sur la reproduction du saumon atlantique ainsi que sur les caractéristiques et impacts des sédiments fins sur la survie des embryons. Une revue critique des techniques existantes d'échantillonnage du substrat et de survie des embryons fait l'objet du chapitre deux et une autre portant sur les techniques de nettoyage du substrat fait l'objet du chapitre trois. Le quatrième chapitre présente la contribution générale de la thèse et de chacun des chapitres suivants à l'avancement des connaissances dans le domaine de la géomorphologie fluviale et de la biologie.

Les chapitres cinq et six présentent respectivement deux articles scientifiques qui ont été soumis dans des revues avec comité de lecture. Ces deux chapitres ainsi que le chapitre 7 constituent le cœur de la thèse et traitent de différents aspects de la problématique des sédiments fins relativement à la reproduction du saumon. Le chapitre huit présente les résultats préliminaires d'expérimentations qui ont été menées dans le but de démontrer en milieu naturel le rôle probable du gradient hydraulique et de d'autres variables, autre que la teneur en sédiments fins, pouvant modifier l'environnement intragravier et affecter la survie des embryons. Enfin, une conclusion générale présente les principaux constats mis en évidence dans la thèse ainsi que les perspectives de recherche.



## CHAPITRE 1

### Généralités sur la reproduction du saumon atlantique et sur l'infiltration des sédiments fins dans le substrat de fraie

---

#### 1.1 Facteurs affectant la survie des embryons de saumon atlantique lors de la période d'incubation

L'objectif général de cette section est tout d'abord de présenter les caractéristiques globales d'un site de reproduction et plus spécifiquement celles d'un nid de saumon atlantique et de présenter les différentes phases de développement des embryons suite à la reproduction. Par la suite, les rôles de l'oxygène dissous et de l'écoulement intergranulaire sont détaillés, étant donné que ces deux facteurs sont essentiels au bon développement des embryons. Les effets négatifs des sédiments fins sur la survie des embryons sont ensuite présentés.

##### 1.1.1 Notions de base sur la reproduction du saumon atlantique

La période d'incubation correspond à la phase du cycle de vie du saumon atlantique au cours de laquelle les embryons se développent dans le substrat du lit de la rivière jusqu'à l'émergence. La période de fraie a généralement lieu en octobre et en novembre (Bernatchez et Giroux, 1991). Les nids sont généralement construits en amont des têtes de seuil où la profondeur de l'eau est faible et où il y a accélération des vitesses de l'écoulement (Fleming, 1996). Ces sites sont caractérisés par des profondeurs moyennes comprises entre 25 et 40 cm (Beland *et al.*, 1982; Moir *et al.*, 1998), des vitesses moyennes d'écoulement d'environ 50 cm/s (Beland *et al.*, 1982; Moir *et al.*, 1998) et un substrat de 2 à 3 cm de diamètre (Crisp et Carling, 1989).

À l'aide de sa nageoire caudale, la femelle creuse le nid pour y déposer ses œufs (figure 1.1). Le temps requis pour la construction du nid est de quelques jours et, tout

dépendant de la taille de la femelle, la profondeur des nids dans le substrat varie entre 15 et 30 cm (DeVries, 1997). La forme finale longitudinale est caractérisée par une dépression en amont suivie d'un monticule en aval (figure 1.1) (Rennie et Millar, 2000; Wu, 2000). Les caractéristiques granulométriques d'un nid sont différentes de celles du substrat environnant car lors du creusage, la femelle modifie l'état de ce dernier en diminuant la quantité de sédiments fins présents et en augmentant la porosité (Montgomery *et al.*, 1996).

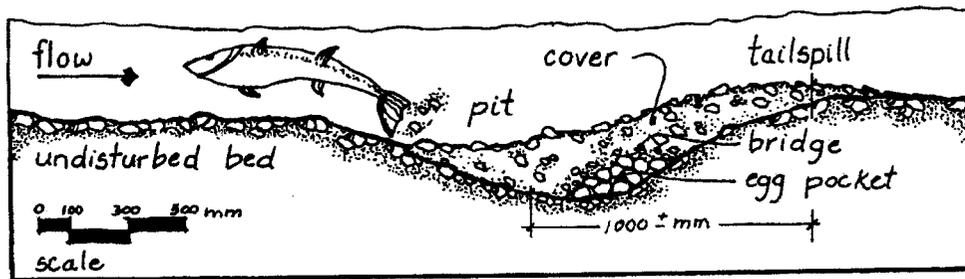


Figure 1.1 Architecture longitudinale et verticale d'un nid typique de saumon (Tirée de Kennie et Millar, 2000).

Les œufs déposés dans le nid sont fertilisés par le mâle et immédiatement recouverts de substrat par la femelle (Scott et Crossman, 1974). On distingue trois stades de développement des embryons lors de la phase intragravier, soient l'œuf vert qui correspond à l'œuf qui vient d'être fécondé, l'œuf oillé (ou embryonné) au travers duquel on distingue les yeux de l'embryon et finalement le stade d'éclosion à la suite duquel l'alevin vésiculé commence à se nourrir du contenu de son sac vitellin (Kamler, 1992; MAPAQ, 1996). La température de l'eau est un facteur qui influence la vitesse de développement des embryons au cours de la période d'incubation (Hamor et Garside, 1976, Kamler, 1992; MAPAQ, 1996). Le temps d'incubation est inversement proportionnel à la température de l'eau. Ainsi, plus les températures sont élevées, plus le temps de développement des embryons avant l'éclosion sera court (Hamor et Garside, 1976). Sous nos latitudes, les embryons restent enfouis dans le substrat pendant environ 6 à 7 mois (DeVries, 1997) et l'éclosion survient au printemps, généralement en

avril (Bernatchez et Giroux, 1991). Suite à l'éclosion, les alevins vésiculés restent cachés dans le substrat pour une période variant de trois semaines à un mois, jusqu'à leur émergence (fin mai, début juin), ce qui met fin à la phase intragravier du développement des embryons.

Pendant la période d'incubation, il est possible de déterminer le stade de développement des œufs de saumon atlantique à l'aide de chartes basées sur le pourcentage de développement quotidien de l'œuf en fonction de la température de l'eau. Il s'agit de cumuler pour chaque jour, à partir de la fertilisation, les valeurs du développement de l'œuf en pourcentage correspondant aux températures de l'eau journalières à partir de la charte établie pour le saumon atlantique (MAPAQ, 1996). Selon cette méthode, le deuxième stade (i.e. œuf oeillé) correspond à 50 % du développement et le troisième stade (i.e. éclosion) à 100 % du développement (figure 1.2). Par exemple, à température constante de 4°C pour toutes les journées d'incubation, 58 jours sont nécessaires afin d'atteindre le stade d'œuf oeillé et 116 jours pour l'éclosion. À 10°C, le stade oeillé est atteint après 24 jours et le stade vésiculé, après 48 jours.

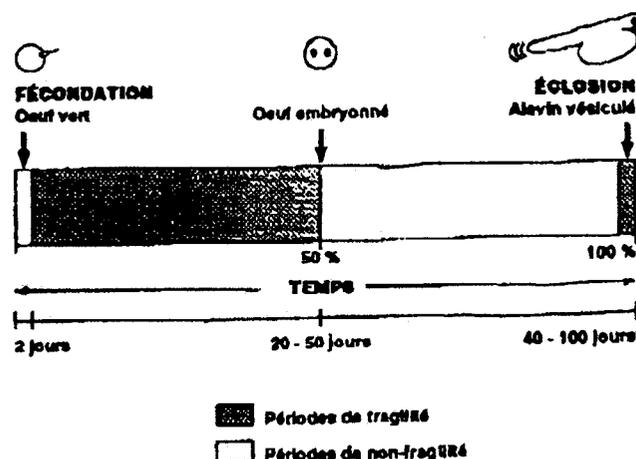


Figure 1.2 Stades de développement des embryons de salmonidés lors de l'incubation  
En noir : Périodes de fragilité; en blanc : période de non-fragilité (Tirée de MAPAQ, 1996).

### 1.1.2 Importance de l'oxygène dissous pour le développement des embryons

La concentration en oxygène dans la chambre à œufs est un facteur très important qui contrôle le développement des embryons. Selon Garside (1966), la vitesse de développement des œufs est retardée proportionnellement à la diminution de la concentration en oxygène présente dans l'eau intergranulaire lors de l'incubation. Par contre, le taux de développement des premiers stades embryonnaires serait peu affecté par de faibles concentrations en oxygène comparativement aux stades plus avancés (Garside, 1966; Hamor et Garside, 1976) où l'embryon devient un organisme de plus en plus aérobique (Kamler, 1992). La période de consommation en oxygène maximale correspond à l'éclosion (Hamor et Garside, 1976; Kamler, 1992) et la concentration minimum en oxygène dissous nécessaire aux embryons qui précède cette période est de 5.8 mg/L (Wickett, 1954).

L'oxygène pénètre dans l'œuf par diffusion, étant donné que ce dernier n'a pas la capacité de capter activement l'oxygène. Par conséquent, l'approvisionnement en oxygène vers les embryons (A) dépend de sa concentration dans l'eau (C) et de la vitesse de l'écoulement intergranulaire (V) (Vaux, 1962; Shapley et Bishop, 1965). Ainsi,  $A = C * V$  (Pollard, 1955). Plusieurs recherches ont permis de démontrer l'importance de fortes concentrations en oxygène associées à de fortes vitesses de l'écoulement intergranulaire en relation avec des taux de survie élevés d'embryons de salmonidés, comme par exemple Wickett (1954), Coble (1961), Sowden et Power (1985), Chapman (1988) et Koudou *et al.* (2001). De plus, à partir d'expériences en laboratoire, Silver *et al.*, (1963) ont démontré que de faibles concentrations en oxygène pouvaient parfois causer plusieurs anomalies des embryons lors du développement ainsi que provoquer un délai du moment de l'éclosion.

### 1.1.3 Importance de l'écoulement intergranulaire à l'échelle du nid et du site de fraie

La vitesse de l'écoulement intergranulaire est le facteur intragravier prédominant, en ce sens qu'elle contrôle l'approvisionnement en oxygène vers les embryons et qu'elle permet d'évacuer les déchets métaboliques en dehors du nid lors de la période d'incubation.

La vitesse réelle, aussi appelée vitesse des pores, est la vitesse de l'écoulement qui passe dans les interstices et qui varie d'un pore à l'autre (Pollard, 1955). La vitesse apparente, aussi appelée vitesse macroscopique, est le taux d'infiltration exprimé par le volume de liquide s'écoulant par unité de temps au travers d'une unité de surface (de solides et de vides) (Coble, 1961). On utilise généralement cette vitesse pour caractériser les conditions intragraviers, étant donné qu'elle est plus facile à mesurer. Ainsi, la vitesse de l'écoulement intergranulaire apparente ( $V$ ) peut se calculer par l'équation de la loi de Darcy selon laquelle,

$$V = - K * n * dh/dl$$

où  $K$  est la conductivité hydraulique,  $n$  est la porosité du substrat et  $dh/dl$  est le gradient hydraulique de la surface de l'eau (Dingman, 1984; Kondolf, 2000) (figure 1.3). La conductivité hydraulique ( $K$ ) dépend des caractéristiques du médium dans lequel un fluide s'écoule, mais aussi des caractéristiques de ce fluide (Dingman, 1984). Ainsi,  $K = (k * g * \gamma) / \mu$  où  $k$  est la perméabilité du substrat,  $g$  est la constante gravitationnelle,  $\gamma$  la densité et  $\mu$  la viscosité de l'eau. Il est à noter que la conductivité hydraulique dépend indirectement de la température, car la densité et la viscosité de l'eau augmentent lorsque la température de l'eau diminue.

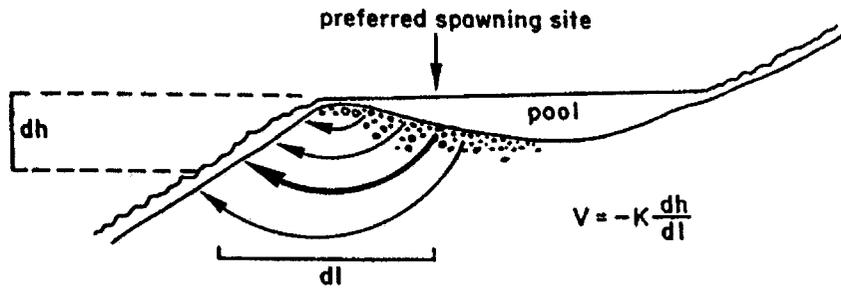


Figure 1.3 Loi de Darcy en relation avec le patron de l'écoulement intergranulaire à travers un nid (Tirée de Kondolf, 2000).

La plus ancienne étude portant sur le sujet est celle de Stuart (1953), qui a démontré à partir d'expériences en laboratoire que la vitesse de l'écoulement intergranulaire ne dépendait pas de la vitesse de l'écoulement de la colonne d'eau mais plutôt du gradient hydraulique du lit du chenal. Les résultats de Vaux (1962) vont dans le même sens, à savoir que les échanges en eau entre le lit et la rivière ainsi que la direction de ces écoulements intragraviers dépendent du profil de la surface de l'eau et indirectement de celui du lit, mais aussi de la perméabilité et de la profondeur du substrat (i.e. profondeur à laquelle l'écoulement intergranulaire a lieu). En 1968, Vaux raffine ses recherches et présente ses résultats de laboratoire qui sont à la base d'une première description des mécanismes d'écoulement intergranulaire qui caractérisent les séquences seuil-mouille typiques à de nombreuses rivières. Ainsi, d'après Vaux (1968), l'écoulement intergranulaire se dirige vers la surface du lit lorsque le profil longitudinal de ce dernier est convexe, mais aussi lorsque la perméabilité ou la profondeur du gravier diminue dans la direction de l'écoulement. À l'opposé, lorsque le profil longitudinal du lit est concave, l'écoulement intergranulaire descend dans le lit. Le même phénomène se produit aussi lorsque la perméabilité ou la profondeur du substrat augmentent dans la direction de l'écoulement (Vaux, 1968). Ainsi, la succession de formes convexe-concave (i.e. seuil-mouille) caractéristique à plusieurs rivières naturelles favorise des régions

d'écoulement alternées qui proviennent du lit ou qui se dirigent vers celui-ci. Enfin, Vaux (1968) présente le patron d'écoulement intergranulaire d'un site de fraie typique de salmonidés (i.e. près de la tête d'un seuil entre deux sections de faible gradient), où l'eau de la rivière qui est fraîchement oxygénée s'infiltré dans le substrat, le traverse pour ensuite remonter vers la surface pour éventuellement rejoindre l'écoulement ambiant.

De plus, étant donné que la topographie du lit influence le profil de la surface de l'eau qui détermine le gradient hydraulique, il est nécessaire de tenir compte du débit lors de la caractérisation des vitesses d'écoulement intergranulaire. Par exemple, lors de faibles débits, les mouilles sont caractérisées par un profil de la surface de l'eau plus faible que le gradient moyen de la rivière, tandis que les seuils sont plutôt caractérisés par une pente de la surface de l'eau plus forte que le gradient moyen de la rivière (figure 1.4). Ainsi, à faible débit, les cassures alternées et irrégulières du profil de la surface de l'eau causées par la topographie du lit favorisent une succession de faibles et de forts gradients hydrauliques qui affecte directement les caractéristiques de l'écoulement intergranulaire. À fort débit, la différence de la pente du profil de la surface de l'eau au-dessus des seuils et des mouilles est moins prononcée (figure 1.4), ce qui favorise des gradients hydrauliques plus uniformes et modérés sur l'ensemble de la rivière.

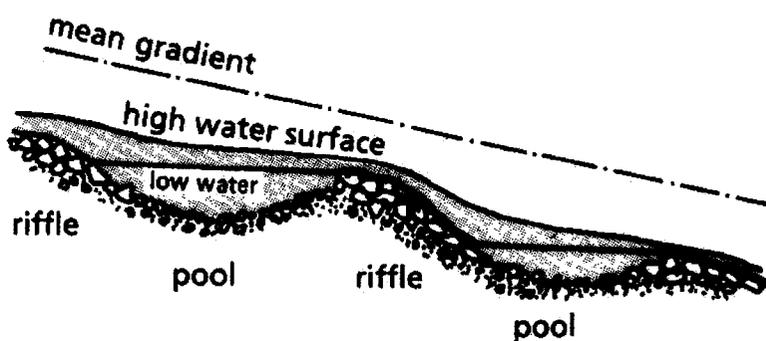


Figure 1.4 Profil caractéristique seuil-mouille en relation avec une variation du débit (Tirée de Petts et Calow, 1996).

La topographie du nid est tout aussi importante que celle du seuil, en ce qu'elle affecte, mais à une autre échelle, les caractéristiques de l'écoulement intergranulaire. Les différences de pression hydrostatique entre le creux et le sommet des nids favorisent l'écoulement intergranulaire (Cooper, 1965) (figure 1.5) de la même façon qu'entre un seuil et une mouille. Ainsi, la forme du nid en elle-même favoriserait l'écoulement intergranulaire dans la chambre à œufs, approvisionnant ainsi les embryons en oxygène dissous dont ils ont besoin pour survivre et se développer.

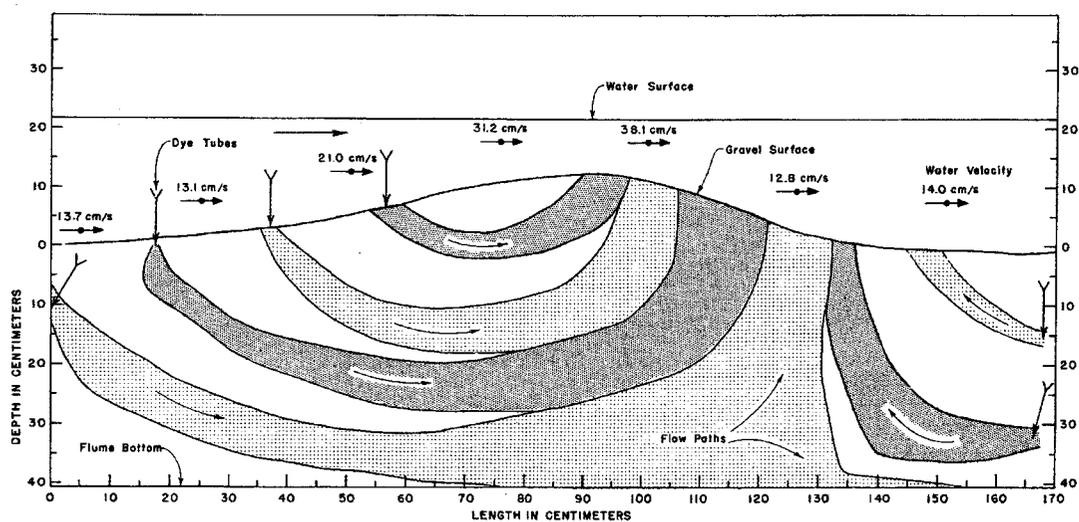


Figure 1.5 Patron d'écoulement en relation avec la topographie du lit, similaire à un nid de saumon qui vient d'être creusé (Tirée de Cooper, 1965).

Plus récemment, quelques chercheurs ont caractérisé la vitesse apparente de l'écoulement intergranulaire à l'échelle du seuil et/ou du nid, par différentes techniques d'échantillonnage. Certains d'entre eux (Curry et Noakes, 1995; Geist, 1999; Baxter et Hauer, 2000; Baxter *et al.*, 2003) ont déterminé la vitesse de l'écoulement intergranulaire par la formule de Darcy à partir de mesures *in situ* du gradient hydraulique ( $dh/dl$ ) à l'aide de piézomètres et de la conductivité hydraulique ( $K$ ) du substrat, évaluée par des essais à chocs hydrauliques. D'autres (Thibodeaux et Boyle, 1987; Harvey et Bencala, 1993) ont utilisés un traceur. Par exemple, en injectant une teinture dans le substrat, il est possible

de déterminer la vitesse en calculant le temps écoulé lors du déplacement du front de teinture sur une distance déterminée. Enfin, Grost *et al.* (1988) et Koudou *et al.* (2001) ont calculé la vitesse de l'écoulement intergranulaire à partir d'un test de dilution. Cette méthode consiste à injecter un mélange coloré à l'intérieur d'un piézomètre et à prélever des échantillons d'eau à intervalles de temps fixe. La couleur des échantillons est ensuite comparée aux couleurs standard d'une charte développée en laboratoire dans le but de déterminer le taux de dilution du colorant pour en calculer une vitesse. Enfin, quelle que soit la méthode utilisée, quelques résultats relatifs au substrat de fraie de salmonidés, que se soit à l'échelle du nid ou du seuil, sont issus de ces recherches. Par exemple, les résultats de Thibodeaux et Boyle (1987) et de Baxter et Hauer (2000) ont démontré que les vitesses intergranulaires les plus fortes caractérisent la crête des seuils. De plus, les résultats de Baxter et Hauer (2000) vont dans le même sens, car ils ont observé que les nids de truite taureau (*Salvelinus confluentus*) étaient localisés aux endroits où les vitesses d'écoulement intergranulaire étaient les plus élevées, soient les têtes de seuil. Finalement, Geist (1999) soulève dans la conclusion de ses recherches l'importance d'incorporer des mesures de l'interaction entre l'écoulement de la rivière et l'écoulement souterrain lors de l'élaboration d'un modèle d'habitats afin de mieux prédire et mieux comprendre les caractéristiques des sites de fraie.

#### **1.1.4 Impacts négatifs des sédiments fins sur la survie des embryons**

Le terme "sédiments fins" n'est pas défini clairement dans la littérature, car la taille des particules classées comme sédiments fins est très variable d'une étude à l'autre. Par exemple, selon Chapman (1988) les sédiments fins correspondent à toutes les particules ayant un diamètre < 6 mm. Certains chercheurs dont Wood et Armitage (1997) proposent une limite supérieure du diamètre des sédiments fins à 2 mm et d'autres à 1 mm (Beschta et Jackson, 1979; Carling, 1984; Sear, 1993) ou à 0.84 mm (Reiser and White, 1988). Enfin, selon la classification de Wentworth (tableau 1.1), on considère généralement que les sables grossiers (0.250 à 2 mm), les sables fins (0.063 à 0.250 mm) ainsi que les silts et les argiles (< 0.063 mm) sont tous des sédiments fins, ce qui correspond à la limite

supérieure de 2 mm proposée par Wood et Armitage (1997). Peu importe la taille de sédiments fins choisie, les résultats de nombreuses études montrent que la présence excessive de ce type de sédiments dans le substrat de fraie affecte négativement la survie des embryons (Carling et McCahon, 1987; Chapman, 1988; Kondolf, 2000; Wood et Armitage, 1997).

Les sédiments fins en quantité excessive dans le substrat de fraie ont deux effets majeurs sur la survie des œufs et des alevins de salmonidés. Tout d'abord, pour les œufs, la présence de particules fines dans les interstices du substrat engendre une réduction de l'écoulement intergranulaire (Everest *et al.*, 1987; Argent et Flebbe, 1999). Ce type d'écoulement est régi par la perméabilité, elle-même associée à la granulométrie du substrat. Plusieurs études ont démontré qu'une faible augmentation de la quantité de sédiments fins à l'intérieur des nids était associée à une diminution de la perméabilité (Reiser et White, 1988; Argent et Flebbe, 1999; Kondolf, 2000), elle-même associée à une diminution de la production de salmonidés (Moring, 1982; Chapman, 1988; Wu, 2000). Il est possible de quantifier la relation entre la granulométrie du substrat et la perméabilité en calculant l'indice du pourcentage de sédiments de 2 mm et moins (SF) (tableau 1.2). Cet indice correspond à la somme des pourcentages des sédiments fins (i.e. sable, limon et argile) contenus dans un échantillon du substrat, qui est calculée à partir de la courbe granulométrique construite à l'aide des pourcentages de masse de particules passant à travers les différents tamis. D'après Peterson (1978), la perméabilité du substrat est considérée bonne si la valeur de l'indice est inférieure à 20 %. Plus l'indice augmente, plus la perméabilité diminue et plus la survie risque d'être faible. D'autres indices (i.e. indice de Peterson, indice de sable et l'indice de Fredle) ont été développés pour évaluer la survie des embryons en relation avec la granulométrie du substrat. L'indice de Peterson (P) est caractérisé par deux paramètres, soit la somme des pourcentages des sables fins et moyens (0.06 à 0.5 mm) (Sf) de l'échantillon et la somme des pourcentages des sables grossiers (0.5 à 2.2 mm) (Sc) (tableau 1.2). À partir d'une double règle de décision, il est possible de déterminer si la survie associée au substrat de l'échantillon est pauvre ou excellente.

Tableau 1.1 Classification de Wentworth des sédiments en relation avec la taille des grains (Tirée de Leeder, 1982).

	<i>US Standard sieve mesh</i>	<i>Millimeters</i>	<i>Phi (<math>\phi</math>) units</i>	<i>Wentworth size class</i>
GRAVEL	<i>Use wire squares</i>	4096	-12	
		1024	-10	boulder
		256	-8	
		64	-6	cobble
		16	-4	pebble
	5	4	-2	
	6	3.36	-1.75	
	7	2.83	-1.5	granule
	8	2.38	-1.25	
	10	2.00	-1.0	
SAND	12	1.68	-0.75	
	14	1.41	-0.5	very coarse sand
	16	1.19	-0.25	
	18	1.00	0.0	
	20	0.84	0.25	
	25	0.71	0.5	coarse sand
	30	0.59	0.75	
	35	0.50	1.0	
	40	0.42	1.25	
	45	0.35	1.5	medium sand
	50	0.30	1.75	
	60	0.25	2.0	
	70	0.210	2.25	
	80	0.177	2.5	fine sand
100	0.149	2.75		
120	0.125	3.0		
140	0.105	3.25		
170	0.088	3.5	very fine sand	
200	0.074	3.75		
230	0.0625	4.0		
SILT	270	0.053	4.25	
	325	0.044	4.5	coarse silt
		0.037	4.75	
		0.031	5.0	
		0.0156	6.0	medium silt
		0.0078	7.0	fine silt
CLAY	<i>Use pipette or hydro-meter</i>	0.0039	8.0	very fine silt
		0.0020	9.0	
		0.00098	10.0	clay
		0.00049	11.0	
		0.00024	12.0	
		0.00012	13.0	
	0.00006	14.0		

Tableau 1.2 Définitions et règles de décision des différents indices de la qualité du substrat.

INDICES	Paramètres requis	Formule	Règle de décision	Référence
<b>% 2 mm et moins (SF)</b>	SF = sédiments fins, diamètre entre 0,06 à 2,2 mm	$SF = \Sigma (\% \text{ des classes de sédiments de } 0,06 \text{ à } 2,2 \text{ mm})$	Si (SF) < 20% = bonne perméabilité Si (SF) > 20% = perméabilité très réduite	Peterson (1978)
<b>Indice de Peterson (P)</b>	Sc = sable grossier, diamètre entre 0,5 à 2,2 mm Sf = sable fin, diamètre entre 0,06 à 0,5 mm	Si Sc est entre 10% et 15% et si Sf est entre 0 et 3%, Alors : P= 1 Sinon, P= 0	Si (P) = 1, survie excellente Si (P) = 0, survie pauvre	Peterson (1978)
<b>Indice de sable (Si)</b>	Sc = sable grossier, diamètre entre 0,5 à 2,2 mm Sf = sable fin, diamètre entre 0,06 à 0,5 mm	$Si = [(Sc)/16 + (Sf)/8]$	Si (Si) < 1, survie excellente $1,0 < (Si) < 1,5$ , survie médiocre Si (Si) > 1,5, survie pauvre	Peterson et Metcalfe (1981)
<b>Indice de Fredle (Fi)</b>	Dg, So	$Fi = [(Dg)/(So)]$	Si (Fi) > 5, probabilité de survie >90%	Lotspeich et Everest (1981)
<b>Moyenne géométrique (Dg)</b>	D16, D84	$Dg = [(D16)*(D84)]^{0.5}$	-----	Lotspeich et Everest (1981)
<b>Indice d'arrangement (So)</b>	D25, D75	$So = [(D75)/(D25)]^{0.5}$	-----	Lotspeich et Everest (1981)

Note: Le D16, par exemple, représente le diamètre dont 16% de la masse totale de l'échantillon est plus petit.

L'indice de sable ( $S_i$ ) utilise une somme pondérée des teneurs en sables grossiers ( $S_c$ ) et fins ( $S_f$ ) (tableau 1.2). À partir d'expériences en laboratoire, Peterson et Metcalfe (1981) ont observé qu'un substrat caractérisé par un indice de sable inférieur à 1 était excellent pour la survie des embryons de saumon atlantique. Par contre, un indice de sable supérieur à 1.5 correspondrait à un taux de survie très pauvre. Enfin, l'indice de Fredle ( $F_i$ ) tient compte du tri, en ce qu'il considère non seulement la partie fine de la distribution granulométrique de l'échantillon, mais aussi la partie grossière de la distribution (Lotspeich et Everest, 1981) (tableau 1.2). La valeur de l'indice augmente avec le diamètre de la moyenne géométrique du substrat ( $D_g$ ) ainsi qu'avec toute réduction de son écart de distribution qui est mesuré par l'indice d'arrangement ( $S_o$ ). Lorsque la valeur de l'indice de Fredle est supérieure à 5, la probabilité de survie est excellente, soit à plus de 90 %. Selon Reiser (1999), aucun de ces indices ne devrait être considéré comme une règle absolue, car il est nécessaire de faire d'autres recherches afin de déterminer les classes de sédiments fins ou la combinaison de classes qui sont les plus nuisibles à la survie des embryons. Tout récemment, Armstrong *et al.* (2003) soulignaient la nécessité de mieux caractériser les processus d'infiltration et de sédimentation sur les sites de fraie, mais plus spécifiquement ceux des particules très fines (i.e.  $< 0.250$  mm).

Pour ce qui est de l'effet des sédiments fins sur les alevins, il est fréquent que le développement et même la survie à l'émergence soient sévèrement réduits (Tappel et Bjornn, 1983). La présence considérable de sédiments fins peut provoquer, entre autres, la suffocation des alevins dans le nid après l'éclosion et aussi nuire à l'émergence (Beschta et Jackson, 1979; Chapman, 1988). Les sédiments fins peuvent bloquer les pores dans le substrat en s'infiltrant en profondeur (Chapman, 1988) ou favoriser la formation d'une couche étanche de sable en se déposant à la surface du lit, bloquant ainsi le déplacement des alevins dans le substrat et par le fait même empêchant l'émergence.

## **1.2 Dynamique du transport et de l'infiltration des sédiments fins lors de l'incubation**

Les objectifs de cette section sont 1) de déterminer d'où proviennent les sédiments fins présents dans le substrat des cours d'eau, 2) de déterminer quand et comment ces sédiments sont transportés dans les cours d'eau et quels sont les facteurs qui contrôlent ces événements de transport et 3) de déterminer quels sont les processus qui régissent leur infiltration dans le substrat et dans les nids de saumon atlantique.

### **1.2.1 Sources des sédiments fins**

L'érosion des berges et du lit du cours d'eau, l'érosion des sols par le ruissellement et les glissements de terrain sont des processus qui contribuent à l'apport naturel de sédiments fins en rivière. De plus, certaines activités anthropiques, entre autres l'agriculture (Richards *et al.*, 1993), les coupes forestières (Scrivener et Brownlee, 1989; Clarke *et al.*, 1998; St-Onge *et al.*, 2001) et la construction de routes et d'infrastructures (e.g. ponceaux) (Boon, 1988; Marchant, 1989; Clarke *et al.*, 1998) peuvent aussi affecter le volume, le taux, le moment et la durée des événements de transport de sédiments fins dans les rivières (Platts *et al.*, 1989). Ces apports provenant d'activités anthropiques s'additionnent aux apports naturels et perturbent l'équilibre des rivières ainsi que le transport de sédiments qui y prévaut.

### **1.2.2 Types de transport de sédiments**

Le transport de sédiments, qui est contrôlé par la disponibilité des sédiments et par la capacité de transport de l'écoulement, est à la base du processus d'infiltration des sédiments fins dans le substrat. En effet, le transport en suspension et celui en charge de fond occasionnent l'infiltration. Le transport en suspension est associé au transport de sédiments fins et s'intensifie avec une augmentation du débit (Frostick *et al.*, 1984). D'après les résultats de Lisle (1989), ce type de transport contribue seulement à 20 % du

matériel infiltré. Ce faible apport s'explique par le fait que les particules en transport de charge de fond sont en contact presque continu avec le lit, ce qui facilite l'accès aux interstices du substrat, comparativement aux particules qui voyagent en suspension (Lisle, 1989). Le transport en charge de fond concerne les sédiments plus grossiers que ceux du transport en suspension (Acornley et Sear, 1999) et est généralement associé aux conditions d'écoulement brèves mais de plus fortes intensités (Frostick *et al.*, 1984), par exemple lors d'une crue. Récemment, un autre mode de transport de sédiments influençant l'apport de sédiments fins dans le gravier a été soulevé, soit le transport intragravier aussi appelé infiltration latérale (Soulsby *et al.*, 2001). D'après une expérience menée en milieu naturel, environ 25 % de la quantité des sédiments infiltrés dans le substrat serait dérivée des mouvements intragraviers (Sear, 1993).

### **1.2.3 Caractéristiques des graviers alluviaux**

La majorité des graviers alluviaux sont constitués d'une structure (framework) formée de particules grossières et d'une matrice correspondant aux interstices entre les particules de la structure, lesquels sont partiellement remplis par des sédiments plus fins (Church *et al.*, 1987). La matrice constitue généralement entre 22 et 32 % du total d'un échantillon de graviers alluviaux (Plumley, 1948 dans Church *et al.*, 1987). Dans ce cas, on est en présence d'une structure du lit typique, constituée d'un pavement, d'un sous-pavement et du lit de base (Diplas et Parker, 1992) (figure 1.6A). Le pavement constitue la couche superficielle du lit qui est généralement composée de matériaux plus grossiers que le sous-pavement (Frostick *et al.*, 1984; Kondolf, 2000). Ce type d'arrangement est généralement caractérisé par une distribution granulométrique bimodale (figure 1.7A). À l'opposé, les graviers alluviaux qui contiennent plus de 30 % de sédiments fins ne présentent pas la même structure du lit subdivisé en trois couches distinctes (figure 1.6B) et sont souvent caractérisés par une distribution granulométrique unimodale asymétrique (figure 1.7B).

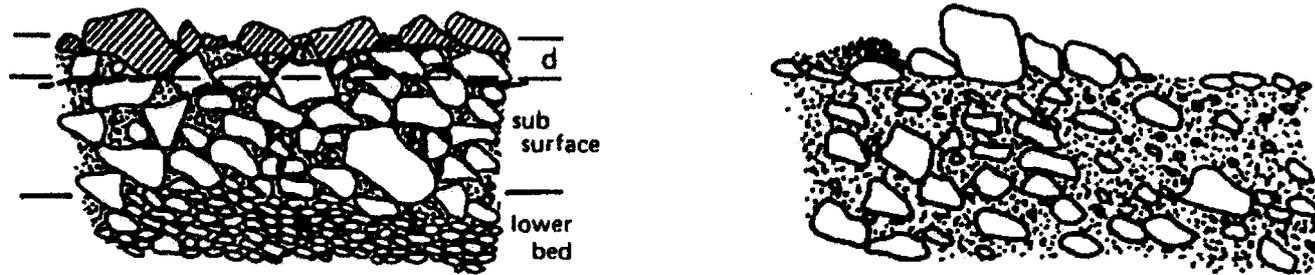


Figure 1.6 Structures du lit des graviers alluviaux (Tirée de Church *et al.*, 1987)

A) Typique: Pavement, sous-pavement et lit de base

B) Plus de 30% de sédiments fins

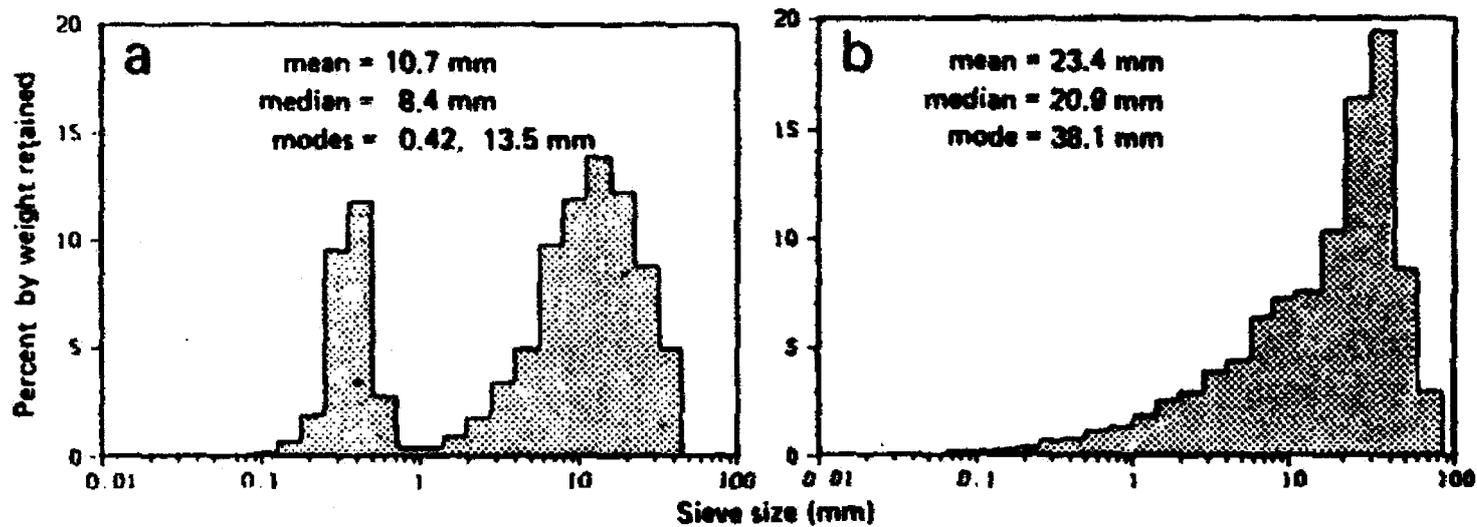


Figure 1.7 Distributions granulométriques des graviers alluviaux de subsurface

A) Bimodale et B) Unimodale (Tirée de Church *et al.*, 1987)

La composition (fabric) des graviers alluviaux dépend de l'arrangement spatial et de l'orientation des particules (Church *et al.*, 1987). L'arrangement spatial des particules dépend de l'intensité de la force exercée sur le lit par les particules lors de leur déposition (Allen, 1970). Par exemple, si la force est grande, les particules seront plus compactées dans le substrat. L'arrangement spatial est généralement exprimé par la porosité, qui se définit comme étant la fraction de l'espace non occupé par des particules solides (Allen, 1970; Dingman, 1984). L'orientation des particules est caractérisée par l'imbrication de celles-ci dont le plus grand axe (axe A) est parallèle à l'écoulement, mais incliné vers l'aval de 10 à 20 degrés avec la surface du lit (Allen, 1970). L'orientation des particules affecte davantage la stabilité du lit comparativement à la distribution granulométrique des particules du substrat (Church *et al.*, 1987).

L'espace disponible (taille des pores), la distribution granulométrique (taille des sédiments de la matrice et de la structure) ainsi que l'arrangement et le degré de compaction (imbrication) des particules sont tous des facteurs qui contrôlent l'infiltration de sédiments fins dans les interstices du substrat au même titre que les apports de sédiments, les mécanismes de transport et les conditions hydrauliques des rivières.

#### **1.2.4 Processus d'infiltration des sédiments fins dans le substrat**

Les sédiments fins s'infiltrent dans le substrat de deux façons différentes (Beschta et Jackson, 1979; Diplas et Parker, 1992; Acornley et Sear, 1999). Le premier patron est caractérisé par l'infiltration sans obstruction des sédiments fins en profondeur. Les sédiments s'infiltrent jusqu'à ce qu'ils rencontrent des espaces interstitiels trop petits pour les laisser s'enfoncer davantage (Frostick *et al.*, 1984) et remplissent ensuite ces interstices du bas vers le haut (Turnpenney et Williams, 1980; Jobson et Carey, 1989). Ce mode de déposition est généralement associé aux sédiments très fins, soit les sables fins et les silts. Par contre, si les sédiments fins sont plus grossiers, les particules qui s'infiltrent bloquent les pores en surface ou à une faible profondeur, empêchant ainsi l'infiltration plus en profondeur d'autres sédiments fins (Chapman, 1988). En fait, ce second patron

d'infiltration est influencé par la formation d'une couche étanche de sable appelée "sand seal" (Beschta et Jackson, 1979; Carling, 1984; Lisle, 1989).

Le patron d'infiltration est aussi contrôlé par la dimension des pores à la surface du lit (Allan et Frostick, 1999). Le remplissage des pores s'effectuera de bas en haut si la couche superficielle du substrat est de composition plus fine que la couche de sous-surface. À l'opposé, si le substrat est structuré de façon inverse, il y aura formation d'une couche de sable en surface (Frostick *et al.*, 1984). La forme des pores joue aussi un rôle dans les processus d'infiltration, en ce qu'elle provoque une sélection des particules infiltrées, surtout lorsque la taille de ces dernières approche celle des pores (Frostick *et al.*, 1984).

#### **1.2.4.1 Effets des crues sur l'infiltration des sédiments fins dans le substrat**

L'intensité des crues est la caractéristique prédominante pour la mise en transport et l'infiltration des sédiments fins. Selon Lisle et Hilton (1999), la mise en transport des sédiments fins de la matrice est dépendante de l'intensité et de la durée de la force d'écoulement permettant la mobilisation du lit plutôt que du volume des sédiments fins de la matrice. Ainsi, ce sont les crues majeures mobilisant le substrat qui permettent de déloger les sédiments fins en profondeur (Beschta et Jackson, 1979; Diplas et Parker, 1992). Sans la mobilisation du substrat, aucun mécanisme n'est apparemment disponible pour déloger les sédiments fins en profondeur (Beschta et Jackson, 1979). D'après Frostick *et al.* (1984), cette profondeur correspond approximativement à deux fois le diamètre dont 90 % de la masse totale de l'échantillon du pavement est plus petit. Lors d'événements d'écoulements plus faibles, qui ne mobilisent pas le pavement, ou lorsque les apports en sédiments fins excèdent la capacité d'entreposage du substrat (i.e. matrice saturée), il a été démontré que les sédiments fins ne s'infiltrèrent pas dans le substrat où le cisaillement demeure localement élevé et s'accumulent plutôt en "patch" dans des zones où le cisaillement local est plus faible comme dans les mouilles (Lisle et Hilton, 1999).

### 1.2.4.2 Effets du couvert de glace sur l'infiltration des sédiments fins dans le substrat

On distingue trois périodes caractéristiques de la présence d'un couvert de glace en rivière, soit la période de formation, la période de couvert de glace stable et la période de débâcle. Chacune de ces périodes influence différemment les processus de transport et d'infiltration des sédiments fins dans le substrat.

La période de formation du couvert de glace est associée à une baisse rapide du débit ainsi qu'à une augmentation de la résistance à l'écoulement causée par la présence du couvert qui agit comme un élément rugueux (Prowse, 1994). La diminution des vitesses et l'augmentation de la hauteur d'eau (figure 1.8), entraînent ainsi une diminution de la capacité de transport (Beltaos *et al.*, 1993; Prowse, 1994).

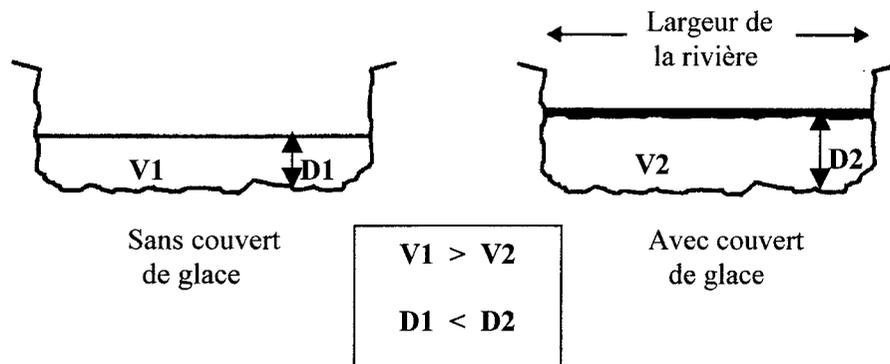


Figure 1.8 Effet du couvert de glace sur la vitesse (V) et la profondeur (D) à débit constant (Modifiée de Beltaos *et al.*, 1993).

Ce phénomène porte à croire que la période de formation du couvert de glace pourrait être associée à une période de déposition et d'infiltration importante des sédiments fins dans le substrat de fraie de saumon atlantique au cours de la période d'incubation. Ensuite, la période qui correspond à la présence d'un couvert de glace stable est caractérisée par de faibles débits et le transport de sédiments est à son minimum, du moins en ce qui concerne le transport en charge de fond. Enfin, la débâcle, qui correspond à la troisième

période du couvert de glace, est caractérisée par un fort potentiel de transport tant en suspension qu'en charge de fond (Prowse, 1993). Pour l'ensemble de la période d'incubation des embryons, cette période est la plus dynamique autant en termes de transport de sédiments de toutes tailles, que de nettoyage et/ou d'infiltration de sédiments fins dans le substrat. Somme toute, les conditions d'écoulement et de transport de sédiments sont très peu documentées en présence d'un couvert de glace. Il est de mise de remédier à cette situation afin de mieux comprendre les processus d'infiltration prévalants sous couvert de glace pouvant affecter la survie des embryons lors de la période d'incubation.

### **1.3 Conclusion : lacunes des études portant sur l'infiltration des sédiments fins dans les nids de saumon et impacts sur la survie**

Les processus d'infiltration de sédiments fins dans le substrat de fraie de salmonidés ont été largement étudiés autant en laboratoire (Beschta et Jackson, 1979; Carling, 1984; Diplas et Parker, 1992) qu'en milieu naturel (Frostick *et al.*, 1984; Carling et McCahon, 1987; Lisle, 1989; Platts *et al.*, 1989; Sear, 1993; O'Connor et Andrew, 1998; Rhodes et Purser, 1998; Acornley et Sear, 1999; Wood et Armitage, 1999; Soulsby *et al.*, 2001). Par contre, deux lacunes sont évidentes. D'abord, aucune étude n'a examiné l'effet des sédiments fins sur la survie des embryons dans un environnement recréant le plus adéquatement possible les caractéristiques d'un vrai nid de saumon. La plupart des études ont été effectuées soit 1) dans un substrat de site de fraie, mais sans recréer la forme typique d'un nid naturel, ou bien 2) en recréant la forme d'un nid naturel, mais en utilisant des techniques d'échantillonnage perturbant les caractéristiques internes d'un nid naturel (e.g. substrat et écoulement intergranulaire).

En second lieu, très peu de chercheurs ont tenté de déterminer quand exactement surviennent les événements qui modifient les caractéristiques du substrat de fraie pendant la période d'incubation. En effet, dans la grande majorité des études portant sur les conditions intragraviers, l'échantillonnage n'a eu lieu qu'à un seul moment lors de la

période d'incubation (e.g. les travaux de O'Connor et Andrew (1998) et ceux de Rhodes et Purser (1998)) ou bien à plusieurs reprises, mais seulement pour une portion de la période d'incubation, notamment les travaux de Frostick *et al.* (1984), Carling et McCahon (1987), Platts *et al.*, (1989), Sear (1993), Wood et Armitage (1999) ainsi que Soulsby *et al.* (2001). Il est reconnu que les conditions intragraviers sont adéquates au début de la période d'incubation (Everest *et al.*, 1987; Kondolf *et al.*, 1993; Montgomery *et al.*, 1996). Par contre, la variabilité du transport de sédiments, l'infiltration de sédiments fins, le changement dans le profil en long du plan d'eau au-dessus du lit, l'état de compaction/consolidation du gravier qui peut réduire la perméabilité (Gustafson-Grennwood et Moring, 1991) sont tous considérés comme des facteurs externes au nid qui peuvent modifier les conditions qui prévalent dans celui-ci au cours de la période d'incubation. Il est nécessaire de remédier à ces deux lacunes en effectuant un suivi des conditions intragraviers et des facteurs influençant ces dernières 1) sur l'ensemble de cette période et 2) dans un environnement recréant les caractéristiques morpho-sédimentologiques d'un nid naturel de saumon.



## CHAPITRE 2

### Revue des techniques d'échantillonnage du substrat et de la survie des embryons

L'objectif de ce chapitre est de présenter les différentes techniques d'échantillonnage qui ont été développées depuis quelques années pour estimer la survie des embryons ou pour mesurer l'infiltration des sédiments fins dans le substrat dans le but de déterminer leurs effets sur la survie des embryons.

#### **2.1 Techniques d'échantillonnage pour estimer la survie**

Les trois méthodes les plus fréquemment utilisées afin d'estimer le succès de reproduction des salmonidés sont, l'excavation des nids, les trappes d'émergence et les boîtes de Withlock-Vibert. L'excavation de nids naturels permet de déterminer la survie en calculant le ratio des embryons vivants sur le nombre total d'embryons retrouvés morts et vivants. Par contre, d'après Rubin (1995), cette méthode n'est pas précise en ce qu'elle suppose que le total d'embryons retrouvés représente la survie réelle naturelle. Afin d'obtenir un taux réel, il serait nécessaire de connaître le nombre total d'œufs qui a été déposé dans le nid lors de la fraie, ce qui reste impossible à déterminer en milieu naturel. De plus, l'excavation de nids naturels représente un problème éthique. Pour cette raison, la construction de nids artificiels constitue une alternative intéressante. Plusieurs chercheurs ont construit ce type de nid pour ensuite y déposer un nombre connu d'œufs fertilisés (Lacroix, 1985; Weaver and Fraley, 1993). Afin d'estimer la survie réelle, les nids sont excavés à la fin de la période d'incubation ou les alevins émergeant sont capturés à l'aide de trappes d'émergence. Ces trappes sont en fait des boîtes grillagées sans fond qui sont déposées sur les nids pour récupérer les alevins émergeants du substrat (figure 2.1A). Par contre, un problème majeur a été soulevé par plusieurs chercheurs concernant ces trappes. Ces dernières modifient les conditions d'écoulement au-dessus des nids et favorisent parfois une plus grande infiltration de sédiments fins à l'intérieur des nids comparativement au gravier environnant (Hausle et Coble, 1976; Reiser et

White, 1988). La boîte de Withlock-Vibert s'avère la méthode la plus répandue afin d'estimer la survie. Un nombre connu d'œufs fertilisés est déposé à l'intérieur d'une petite boîte perforée qui contient du gravier nettoyé (figure 2.1B). La boîte est ensuite enfouie dans le substrat de façon à reproduire la forme d'un nid naturel de salmonidé (Vibert, 1949 dans Mackenzie et Moring, 1988) et est finalement retirée du substrat au moment jugé opportun. La littérature propose plusieurs modifications de cette méthode en changeant la taille, la forme, le type de matériel utilisé pour la construction des boîtes et finalement en déposant ou non à l'intérieur de ces récipients des sédiments d'une taille connue (Harris, 1973; Tappel et Bjornn, 1983; Mackenzie et Moring, 1988; Reiser et White, 1988; Scrivener, 1988; Maret *et al.*, 1993).

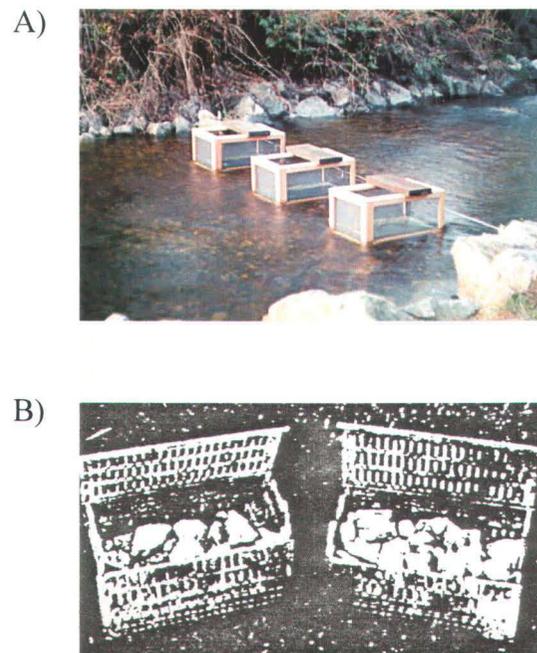


Figure 2.1 A)Trappe d'émergence (Source: Royal British Columbia Museum)  
B) Boîtes de Whithlock-Vibert modifiées (Tirée de Wesche *et al.*, 1989)

Quelques problèmes sont associés à cette méthode. Tout d'abord, les boîtes agissent souvent comme une trappe à sédiments, tout comme les trappes d'émergence, en accumulant, à cause de leurs parois, des quantités importantes de sédiments fins pendant la période d'incubation. Ceci démontre que même si les boîtes sont installées dans le substrat de façon à reproduire la forme d'un nid, elles ne laissent pas libre cours aux processus d'écoulement intergranulaire et d'infiltration qui caractérisent un nid naturel. De plus, étant donné la trop grande proximité des œufs à l'intérieur de ces boîtes, ces dernières favorisent souvent la propagation d'infections aux champignons (Harshbarger et Poter, 1982). D'autres méthodes doivent éventuellement être investiguées, étant donné qu'aucune de ces techniques n'est parfaitement appropriée pour estimer la survie.

## **2.2 Techniques d'échantillonnage du substrat**

Afin de mieux comprendre les processus de transport et d'infiltration de sédiments fins dans le substrat de fraie durant le période d'incubation, une grande variété de techniques d'échantillonnage ont aussi été développées. La méthode la plus simple et fréquemment utilisée est celle de la trappe à sédiments (figure 2.2A), qui consiste à installer un récipient (e.g. boîte, boîte de conserve, chaudière) dans le substrat dont l'ouverture se situe au même niveau que le lit du cours d'eau. Plusieurs chercheurs ont utilisé ce type de méthode, avec du substrat nettoyé (i.e. sans sédiments fins) placé à l'intérieur de la trappe (Lisle, 1989; Lisle et Eads, 1991; Lisle et Lewis, 1992) et d'autres sans substrat (Fletcher *et al.*, 1995; Bond, 2002). Par contre, un problème important associé à cette méthode est qu'il est fréquent que la trappe ne permette plus l'échantillonnage lorsqu'elle se trouve exposée au-dessus du lit par des événements d'érosion importants. De plus, la trappe perturbe les processus intragraviers naturels, notamment l'écoulement intergranulaire et l'infiltration latérale de sédiments fins qui sont deux processus importants caractérisant les conditions intragraviers d'un nid naturel.

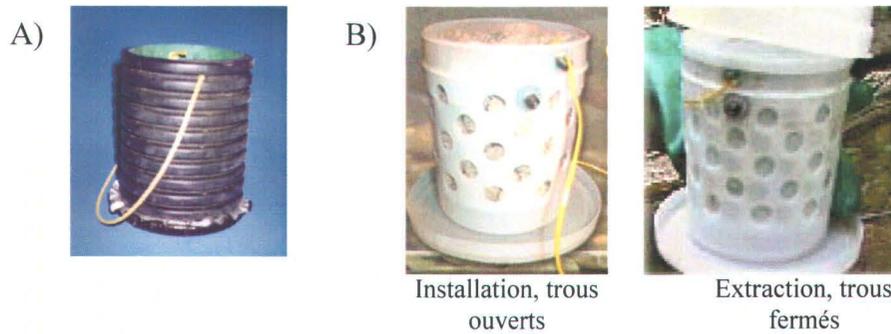


Figure 2.2 A) Trappe à sédiments  
B) Sédibac (Source : Bio Innove Inc.)

Afin de remédier à ce problème, certains chercheurs (Wesche *et al.*, 1989; Acornley et Sear, 1999; Soulsby *et al.*, 2001; Lachance et Dubé, 2004) ont privilégié l'utilisation de récipients perforés qu'ils remplissaient avec du substrat de taille connue. Par contre, plusieurs inconvénients caractérisent ce type de contenant. Tout d'abord, le volume interstitiel est souvent trop petit et, tout dépendant des événements d'infiltration, les récipients se remplissent rapidement et deviennent saturés (Bond, 2002). De plus, lorsqu'ils sont extraits du lit, une quantité non négligeable de sédiments fins peut s'échapper par les orifices (Lisle et Eads, 1991), à l'exception du Sédibac (figure 2.2B) qui possède un dispositif de fermeture des perforations activé juste avant l'extraction afin d'éviter toute perte de sédiments fins (Lachance et Dubé, 2004). Enfin, tout comme les contenants non perforés cités précédemment, le problème d'une éventuelle exposition du récipient par des événements d'érosion est encore non résolu et le volume d'échantillonnage est relativement petit, variant de 2 à 5 kg en fonction du type de contenant utilisé.

Afin de mesurer l'infiltration de sédiments fins dans le substrat sur une certaine période de temps, plusieurs autres techniques peuvent être utilisées, comme par exemple le "freeze core", l'échantillonneur Mc Neil et la cellule d'isolation du courant. Dans le but de quantifier le changement de l'état du substrat avec ces trois techniques *in situ*, il est nécessaire d'échantillonner à deux reprises, soit avant et après un événement

hydrologique considéré propice à la modification de la composition du gravier. Le "freeze core" est une section verticale de substrat qui a été gelée à l'aide d'un tube inséré dans le lit dans lequel de l'azote liquide ou du dioxyde de carbone a été injecté (figure 2.3) (Lisle et Eads, 1991). Suite à l'injection, le tube se refroidit et gèle l'eau interstitielle ainsi que le substrat environnant. Les inconvénients de cette technique sont que l'échantillon est relativement petit, soit environ 10 kg et que la distribution de la taille des sédiments résultante est souvent inadéquate (Lisle et Eads, 1991), car généralement les particules grossières (> 64 mm) ne sont pas récoltées. Enfin, il est souvent difficile d'insérer le tube dans le lit des rivières graveleuses.

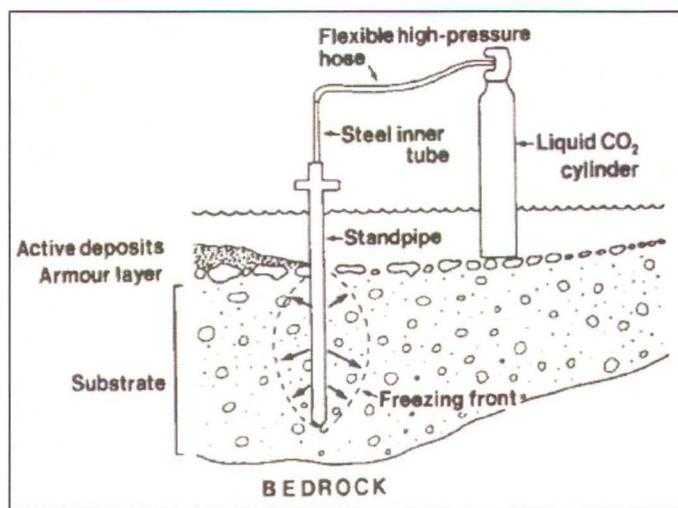


Figure 2.3 Technique du Freeze core (Tirée de Petts *et al.*, 1989).

L'échantillonneur McNeil est formé d'un cylindre avec lequel il est possible de creuser le lit de la rivière pour en retirer une certaine quantité de sédiments. L'eau et les sédiments à l'intérieur du cylindre sont ensuite filtrés par une série de tamis de plus en plus fins, ce qui permet d'évacuer l'eau de l'appareil pour ensuite récolter les sédiments. Tout comme le freeze core, les échantillons récoltés sont petits, variant entre 3 et 10 kg en fonction de la grosseur du cylindre utilisé. De plus, il est très fréquent que seul le pavement soit

échantillonné avec cet appareil. Enfin, la cellule d'isolation du courant (figure 2.4) permet de remédier à ces lacunes (Payne et Lapointe, 1997). La structure sans fond est installée sur le lit de la rivière et l'échantillon est prélevé à l'intérieur de celle-ci à l'aide d'une pelle jusqu'à une profondeur d'environ 20 à 30 cm. Un filet de nytex (78 microns) installé à l'arrière de la cellule permet de récolter les sédiments fins entraînés par le courant lors de l'excavation. Le pavement et le sous-pavement sont prélevés séparément et chaque échantillon récolté pèse entre 100 et 150 kg. Un problème associé à cette technique est que lors de l'excavation, une certaine quantité de sédiments fins a tendance à se déposer dans le fond de la dépression et il devient difficile de les récupérer.

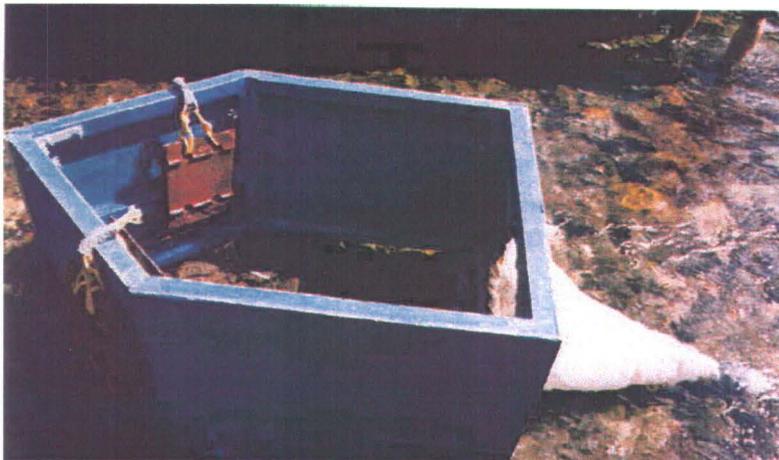


Figure 2.4 Cellule d'isolation du courant

Le sac d'infiltration (figure 2.5) développé par Sterling (Lisle et Eads, 1991) permet d'échantillonner le substrat sans les problèmes caractérisant les autres techniques d'échantillonnage. La méthode consiste à déposer un sac rabattu dans une dépression préalablement creusée dans le lit de la rivière et ensuite de le recouvrir de gravier de taille connue relativement homogène. Après une certaine période de temps, le gravier expérimental ainsi que les sédiments fins qui se sont infiltrés pendant la période d'échantillonnage sont récoltés en même temps lors de l'extraction du sac hors du lit.

L'écoulement intergranulaire ainsi que les processus latéraux d'infiltration ne sont pas affectés par cette technique et le volume d'échantillonnage est représentatif.

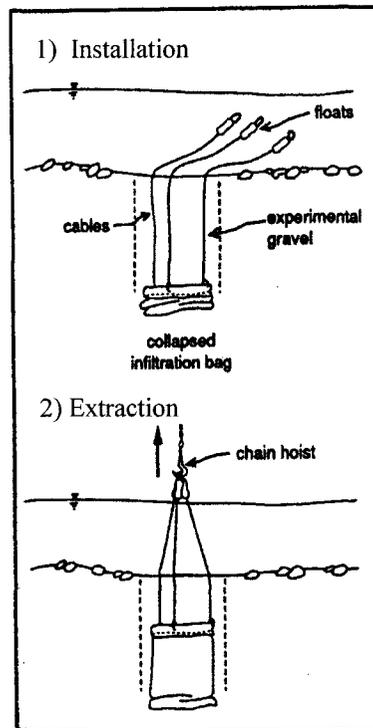


Figure 2.5 Sac d'infiltration (Tirée de Lisle et Eads, 1991).

### 2.3 Utilisation de plusieurs techniques pour déterminer l'impact des sédiments fins sur la survie

Certains chercheurs ont combiné l'utilisation de quelques techniques pour tenter de déterminer l'impact des sédiments fins sur la survie. Par exemple, Thurow et King (1991) ainsi que Maret *et al.* (1993) ont utilisé des contenants de type boîte de Vibert pour incuber les œufs et ont échantillonné le substrat en périphérie de nids artificiels, tout simplement à l'aide d'une pelle ou bien de "freeze core". D'autres, soit Sowden et Power (1985) et Ingendahl (2001), ont utilisé des trappes d'émergence pour l'incubation

et le freeze core afin d'échantillonner le substrat. Par contre, aucune de ces techniques n'est adéquate pour effectuer à la fois le suivi de l'incubation des embryons et celui des caractéristiques du substrat en simultané et ce, tout au long de la période.

#### **2.4 Conclusion et nécessité d'amélioration**

La majorité de ces techniques, que ce soit pour échantillonner le substrat ou bien estimer la survie, possède individuellement certains inconvénients. Lorsque vient le temps de relier le succès de survie des embryons de salmonidés aux caractéristiques du substrat et, plus particulièrement, aux processus d'infiltration survenant pendant la période d'incubation, l'utilisation d'aucune de ces techniques n'est appropriée. Aucune d'entre elles ne permet de reproduire adéquatement les conditions d'un nid naturel, ni d'effectuer le suivi de l'état des embryons et des caractéristiques du substrat en simultané pendant l'incubation. Le développement d'une nouvelle technique d'échantillonnage permettant de combler ces lacunes est nécessaire afin de mieux comprendre l'impact des sédiments fins sur la survie des embryons de salmonidés.

### **CHAPITRE 3**

#### **Revue des techniques de nettoyage du substrat**

---

Plusieurs techniques de nettoyage ont été développées depuis les trente dernières années afin de diminuer la quantité de sédiments fins dans le substrat de fraie des salmonidés dans le but d'améliorer les taux de survie. La section qui suit présente une revue de la littérature de ces techniques de nettoyage du substrat.

#### **3.1 Réduction à la source de l'apport de sédiments fins**

Cette technique est la plus écologique, mais aussi la plus compliquée à envisager. 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 sur une certaine période de temps. Par contre, les raisons pour lesquelles certaines rivières possèdent une quantité de sédiments fins au-dessus de la normale sont directement reliées à certaines activités anthropiques, comme par exemple l'agriculture et les coupes forestières. Ces dernières 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, dans certains cas, il est possible de réduire et/ou de limiter ces apports.

Par exemple, une diminution efficace à la source d'apports de sédiments fins a été effectuée aux États-Unis vers la fin des années 1980. Un site minier inactif contribuait à la dégradation des habitats de fraie du saumon chinook et de la truite arc-en-ciel par l'apport incessant de sédiments fins dans la rivière Bear Valley (Rowe *et al.*, 1989). En 1989, un programme de revégétalisation fut complété dans le but de diminuer ces apports. 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.

Un autre exemple est celui de la rivière South Fork Salmon en Idaho. En 1965, un moratoire a été appliqué sur les coupes forestières de cette région. À ce dernier fut associée 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. En 1966, le pourcentage de sédiments fins du substrat s'élevait à 46 % de la superficie de l'aire d'étude et à 48 % du volume échantillonné. En 1985, le pourcentage de sédiments fins du substrat s'élevait à 19,7 % de la superficie et à 25,4 % du volume échantillonné (Platts *et al.*, 1989).

Le problème majeur de cette technique 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, les stocks de poissons ne cessent de diminuer. 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 le mieux possible l'apport de sédiments fins à la source, 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, les intervenants de la Société de la Faune et des Parcs du Québec (FAPAQ) tentent de limiter les apports de sédiments en stabilisant certaines zones d'érosion actives par la construction d'enrochements légers à l'aide de toiles géotextiles et de « mottes » de végétation relocalisées (Boivin, 1998). Ces dernières sont prises à l'extérieur du site et déposées sur la zone à stabiliser.

### **3.2 Scarification**

Cette technique consiste à utiliser un râteau ou un tracteur muni d'une fourche pour labourer le lit d'un cours d'eau. Ce remaniement du substrat permet de déloger les sédiments fins et de les mettre en suspension. Shackle *et al.* (1999) ont utilisé une technique semblable, soit un rotovateur tiré par un tracteur, dans le but de nettoyer un site de fraie pour la truite brune. Les résultats ont démontré que cette méthode ne réduisait pas

nécessairement de façon significative le pourcentage de sédiments fins présents dans le substrat et que seulement deux de leurs cinq sites nettoyés montraient une amélioration significative ( $p < 0,05$ ) du taux de survie de l'espèce étudiée.

En 1997, un programme expérimental pour l'amélioration de l'habitat d'incubation des œufs d'une espèce de corégone 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 de déloger les sédiments fins présents dans les interstices des nids et ainsi conserver de bonnes conditions d'incubation. Une procédure de scarification a été utilisée sur les aires de fraie et d'incubation du corégone 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 qui détruit l'armure du lit tout en augmentant la taille et aussi le nombre d'espaces interstitiels du substrat (Groves, comm pers., 2000). Les résultats ont aussi montré que les sites scarifiés étaient associés à une meilleure survie des œufs comparativement aux sites non scarifiés. Par contre, cinq mois après la scarification initiale, BC Hydro a observé un fort taux d'infiltration de sédiments fins dans le substrat. 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 nécessite des manipulations récurrentes et 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 en aval du site nettoyé. Suite à la scarification, une méthode de cueillette des sédiments fins mis en transport devrait être envisagée afin d'éviter de contaminer d'autres sites localisés en aval.

### 3.3 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 amphibie qui soutient une structure sur laquelle sont installés de petits tuyaux qui pénètrent verticalement le substrat jusqu'à une profondeur de 30 cm (figure 3.1) et qui injectent de l'eau sous pression dans le substrat. Les sédiments fins sont ainsi expulsés du lit et pompés par l'écran de suction. Le mélange d'eau et de sédiments est ensuite expédié sur la berge à une distance d'environ 30 m (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 ( $< 0.4$  mm) était notable suite à un nettoyage du gravier à l'aide du riffle sifter (Meehan, 1971).

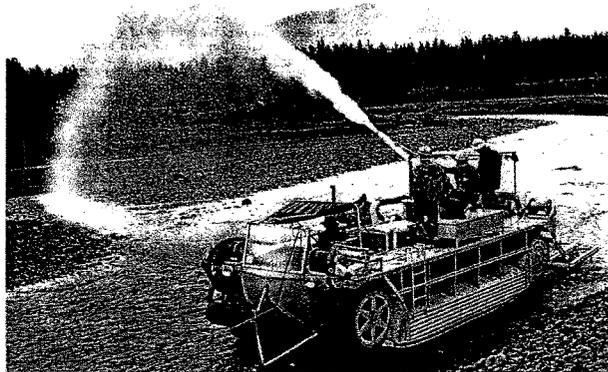


Figure 3.1 Riffle sifter (Tirée de Shields, 1968).

Il est légitime de se demander si cette technique provoque des effets négatifs et irréversibles sur les micro-organismes du fond des rivières qui constituent la base même de la chaîne alimentaire en milieu fluvial. D'après Meehan (1971), la technique ne serait pas défavorable à long terme sur les populations de ces micro-organismes benthiques.

Après seulement quelques mois, 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.

Par contre, plusieurs problèmes techniques peuvent aussi survenir étant donné la complexité de l'appareil. Certains utilisateurs ont noté que le système d'ancrage devenait souvent lâche et que les tuyaux de nettoyage ne pénétraient pas efficacement dans le substrat (Mih, 1978). Certains utilisateurs ont même remarqué que l'appareil semblait parfois modifier les caractéristiques de l'écoulement intergranulaire en favorisant l'apport vers la surface de sédiments fins provenant des profondeurs. Il a même été démontré que la production d'œufs avait été meilleure dans une section contrôle que dans une section nettoyée par le riffle sifter (Andrew, 1974). Un autre problème de cet appareil est que les sédiments fins expulsés sur la berge peuvent éventuellement réintégrer le système par ruissellement lors de pluies intenses ou par le simple gonflement des eaux de la rivière.

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

Le air-water jet ressemble au riffle sifter à quelques différences près, mais plus spécifiquement par l'utilisation d'un mélange d'air et d'eau et non seulement d'eau (Mih, 1978). D'après des expériences menées en 1972 et 1973 en chenal artificiel de fraie, environ 60 % du matériel plus petit que  $2.38 \mu\text{m}$  avait été délogé du substrat (profondeur de 25 cm) suite à l'utilisation de l'appareil (Andrew, 1974). De plus, le taux de survie des œufs à l'émergence avait augmenté. Par contre, la technique était plus ou moins efficace en milieu naturel, car la présence accrue de blocs en surface empêchait les jets d'atteindre les sédiments fins logés en profondeur dans le substrat.

Tout comme la scarification, cette méthode est elle aussi reliée aux conditions d'écoulement. Selon Andrew (1974), l'appareil 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. Il serait donc important de récolter les sédiments fins qui sont délogés du substrat suite au nettoyage.

### 3.5 Curage : action combinée de deux jets d'eau perpendiculaires

Cette technique, développée par la FAPAQ, consiste à injecter un premier jet d'eau perpendiculairement au lit pour démobiliser le substrat à une profondeur d'environ 50 cm et un second, injecté parallèlement à l'écoulement tout près du lit, pour pousser vers l'aval les sédiments fins mis en suspension par l'action du premier jet (Boivin, comm. pers., 2000). Les sédiments se déposent plus loin en aval en une forme de vague de sable dès qu'ils rencontrent une zone d'écoulement faible. À la différence des autres techniques, les sédiments fins sont récoltés à la main dans des chaudières disposées de façon à ce que l'ouverture soit face à l'amont afin de faciliter la cueillette.

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 toute intervention de nettoyage, ils installent des boîtes d'incubation avec Astro-turf<sup>1</sup> dans le but de favoriser la reproduction de l'espèce concernée (i.e. omble de fontaine) et aussi pour diminuer le temps de colonisation des sites restaurés (Boivin *et al.*, 1998). Lors de l'extirpation de la boîte d'incubation, il est possible de calculer le taux de survie puisque le nombre d'œufs implantés au départ et le nombre d'œufs non-éclos sont connus. La qualité de toutes les méthodes de nettoyage utilisées par la FAPAQ sont donc indirectement testées à l'aide des taux de survie. La méthode de curage est largement employée par la FAPAQ étant donné le succès du taux de survie élevé qui a souvent été noté suite à son utilisation.

---

1 Marque de commerce d'un type de gazon artificiel pour couvrir le sol.

La technique de curage est une méthode simple, peu coûteuse et rapide. Par contre, il est difficile de concevoir de l'utiliser pour nettoyer des sites de fraie sur de larges et profondes rivières, comme c'est le cas pour une grande majorité de rivières à salmonidés du Québec. Cette technique a plutôt été développée pour restaurer des sites de fraie de truites en ruisseaux.

### **3.6 Flushing flow**

Cette technique requiert la présence d'un ou de plusieurs barrages sur le cours d'eau et génère souvent plusieurs impacts sur la dynamique générale de la rivière. Une simple régulation d'un réservoir peut faire varier la topographie, la profondeur et la vitesse de l'écoulement, 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 aquatiques consiste en une accumulation et déposition de sédiments fins sur le lit qui proviennent des tributaires en aval du réservoir. Cette déposition est causée par la réduction de la capacité de transport de la rivière, provoquée par la présence du barrage qui élimine les événements d'écoulement majeurs. 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 de ce type de structure sur une rivière modifie les régimes d'écoulement en produisant une réduction nette du débit annuel (Kondolf *et al.*, 1987). Si les événements hydrauliques majeurs qui se produisent habituellement en conditions naturelles ne sont pas reproduits par un ou des relâchements d'eau, il y aura accumulation de sédiments fins dans les interstices du substrat en aval des aménagements (Kondolf *et al.*, 1987). Les sites potentiels de fraie localisés en aval des barrages peuvent être affectés par ce phénomène.

Il est donc nécessaire de faire certaines relâchées périodiques et surtout de bien prévoir l'opération afin d'en tirer le maximum de bénéfices. Il est possible de profiter de ces relâchées d'eau 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 supposant que le flushing flow doit imiter le régime naturel d'écoulement que l'on établit 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 les conditions hydrauliques nécessaires afin d'entraîner les sédiments d'un site prédéterminé (Kondolf et *al.*, 1987). On peut donc 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).

Par contre, 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, il est préférable de s'abstenir d'effectuer un flushing flow lors des périodes d'incubation. Sinon, on doit 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 reproduction. 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.

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. La quantité d'eau emmagasinée et celle requise pour effectuer les relâchées ainsi que la période de l'année concernée, sont deux facteurs pouvant permettre ou non l'opération de nettoyage.

### **3.7 Déflecteur-barrière (Baffle gate)**

Le principe de cette technique est relativement simple. Une grande plaque de bois est déposée sur l'eau avec un certain angle par rapport au lit, provoquant ainsi une concentration de l'écoulement de façon à ce que les vitesses augmentent en aval, à proximité 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. Les difficultés liées à la manipulation de cet appareil sont nombreuses, étant donné la taille imposante du déflecteur qui est difficile à déplacer et à installer dans l'environnement complexe des rivières. Le système de forces requis pour retenir cette structure sur la rivière lors des opérations de nettoyage est aussi considérable et compliqué (Mih, 1978).

### **3.8 Trappes à sédiments**

Il existe plusieurs sortes de trappes à sédiments et cette méthode est très répandue. Par exemple, dans l'état du Michigan, 166 trappes sont entretenues annuellement sur 112 rivières différentes (Ylkanen, 1993). 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. 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). Selon les 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 sort de la trappe, il possède plus d'énergie et il est 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, afin d'optimiser le nettoyage sur une longue section de rivière.

Les trappes à sédiments sont des aménagements généralement très efficaces. Par exemple, une trappe a été construite sur une rivière au Michigan au début des années 1980 et

d'après les résultats d'une étude de suivi, 86 % des sables et 10 % des sédiments plus fins avaient 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 possède aussi quelques inconvénients. L'outillage nécessaire pour creuser les trappes est souvent imposant (e.g. pelle mécanique). De plus, il est primordial de vidanger les sédiments fins déposés dans les trappes au moins une fois par année selon les caractéristiques de la rivière comme le débit, la quantité de sédiments disponible et les caractéristiques du transport de sédiments (Hermansen et Krog, 1985). En principe, la présence de trappes à sédiments améliore la morphologie du chenal de la rivière en aval, en diminuant la quantité de sable en charge de fond et en augmentant la proportion de graviers dans la composition du substrat (Avery, 1996). Par contre, il est fréquent que l'enlèvement des sédiments en charge de fond à l'aide des trappes provoque un déséquilibre sédimentaire à un point tel que davantage d'incision du lit ou de l'érosion excessive peuvent en résulter en aval. En ce sens, la méthode n'est pas toujours adéquate, car les lits de rivière qui s'érodent facilement peuvent s'encaisser excessivement lorsque des bassins sont creusés.

### **3.9 Augmentation de la pente pour améliorer un site de fraie**

La technique est 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 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 de 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).

Hermansen et Krog (1985) ont proposé une idée semblable, soit d'utiliser d'anciens barrages pour construire des lits de fraie potentiellement utilisables. À ces endroits, ils suggéraient 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 3.2).

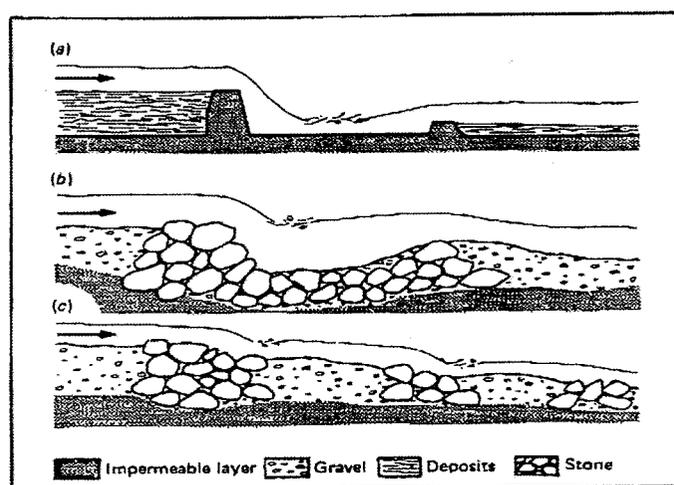


Figure 3.2 Création de sites de fraie au moyen de barrage (Tirée de Hermansen et Krog, 1985)

- a) Vieux barrage avec dépôt de sédiments
- b) Lit artificiel de fraie construit à l'aide du barrage
- c) Sites de fraie artificiels consécutifs.

### 3.10 Seuils et déflecteurs

La technique de seuils consiste 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 blocs et favorise ainsi, juste en amont de la structure, un site de fraie de conditions hydrauliques exceptionnelles et de graviers propres dû à l'accélération du courant à cet endroit. Des observations de terrain ont prouvé que certains saumons ont frayé en amont de la crête de ces ouvrages pendant les deux années de l'étude (White, 1942). Il faut utiliser cette méthode avec prudence, en s'assurant que le niveau d'eau sera assez haut lors de la période d'incubation des œufs afin d'assurer un écoulement intergranulaire constant dans les nids.

La construction de déflecteurs est une méthode plus répandue que celle des seuils. Il existe plusieurs types de déflecteurs de tailles et de formes très variées. Par exemple, 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). En 1983, 26 déflecteurs s'étendant d'une berge à l'autre ont été construits à l'aide de gros blocs sur la Fish Creek. La technique fut efficace, car la plupart des déflecteurs avaient capté du gravier propice à la fraie à la suite de plusieurs crues subséquentes et ce gravier avait été utilisé comme site de fraie par la truite arc-en-ciel. Par contre, il a aussi été noté que l'aménagement avait provoqué la perte d'habitats d'hiver et d'été pour les truites d'un an et plus, car les blocs utilisés pour la construction des déflecteurs avaient été prélevés sur des seuils de la rivière, à l'intérieur du périmètre mouillé, qui constituent l'habitat préférentiel des juvéniles de l'espèce étudiée (Everest *et al.*, 1989). D'autres projets du genre ont cependant très bien fonctionné, entre autres, celui de Fusilier et Edds (1995) au Kansas qui ont construit un déflecteur en V pointant vers l'amont construit à partir de graviers provenant d'une carrière. Deux ans après la construction de l'ouvrage, le site artificiel continuait d'être stable et aussi d'accueillir certaines espèces pour la fraie.

Une autre technique consiste à construire de petits déflecteurs qui permettent de reproduire les conditions de gravier et d'écoulement caractérisant les nids naturels de saumon atlantique. Les mini-défecteurs orientés dans le sens de l'écoulement (1.5 m de haut par 1.5 m de large) sont construits à l'aide de blocs prélevés directement du site à

restaurer (White, 1942) (figure 3.3). 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, un bloc est ancré afin que ce dernier soit inférieur en hauteur aux deux bras du déflecteur. 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 râteau à une profondeur d'environ 10 cm afin de déloger la majorité des sédiments fins. Pour terminer, un trou de 45 cm de diamètre et de 25 cm de profond est creusé en amont à proximité de l'apex du déflecteur, qui est ensuite rempli avec du gravier nettoyé. Quatre mini-déflecteurs ont été construits sur un site habituellement non utilisé par le saumon en période de fraie (White, 1942). D'après les observations de terrain de White (1942), les quatre sites ont été utilisés par l'espèce pour la reproduction. Cette technique est efficace et ne demande pas beaucoup de matériel. Par contre, elle peut devenir très laborieuse en temps de construction surtout lorsque plusieurs déflecteurs doivent être fabriqués. 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.

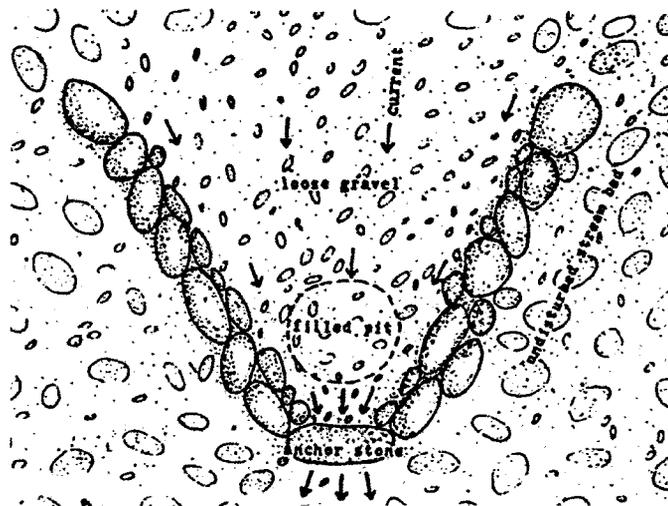


Figure 3.3 Site de fraie artificiel avec mini-déflecteur de pierres en V (Tirée de White, 1942).

Certaines tentatives d'amélioration de sites de fraie à l'aide de déflecteurs ont aussi 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 avait été installé. En 1981, une couche de sable de 10 à 20 cm d'épaisseur recouvrait le lit dans toute la partie aval, à proximité 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 (Hermansen et Krog, 1985).

### **3.11 Remplacement du gravier de frayères par ajout de graviers nettoyés**

L'opération consiste à déposer du gravier de taille spécifique sur des sites de fraie connus et utilisés par le saumon. Il existe plusieurs façons de procéder, entre autres, 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 par exemple d'une carrière. Quelques variantes à cette méthode existent. On peut, entre autres, construire des seuils perpendiculairement à l'écoulement et déposer entre chacun d'eux une certaine quantité de gravier nettoyé (figure 3.4) (Hutchinson et Tylor, 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 permettre le mouvement de l'eau à travers les différentes couches de graviers (Avery, 1996).



Figure 3.4 Seuils retenant le gravier ajouté (Tirée de Hutchinson et Taylor, 1988).

Un projet de ce type a été mené en 1990 sur la Merced River en Californie afin de réhabiliter certains sites de fraie du saumon chinook (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 3.5). En 1994, une étude de suivi a été effectuée afin de documenter les conditions du site lui-même ainsi que les parties amont-aval à proximité du site restauré. Le gravier propre déposé sur le lit avait été érodé de 0.6 m dans les sections en amont et avait été transporté et déposé dans les sections en aval du site par un débit ayant une période de retour de 1.5 ans. Bref, la couche de nouveaux graviers avait 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 était 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 de l'aménagement dans moins de 15 ans.

D'autres projets du genre ont été effectués sur quelques rivières du Wisconsin et ont aussi échoué, 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 (Avery, 1996).

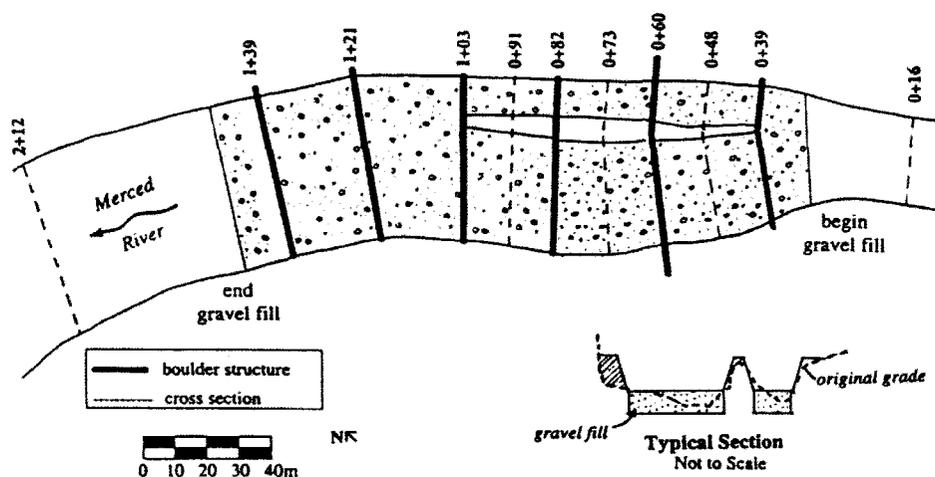


Figure 3.5 Plan du site du projet de restauration de la Merced River, Californie. Les lignes noires représentent les structures de gros blocs (Tirée de Kondolf *et al.*, 1996).

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 permettant aux véhicules de venir déposer les importantes quantités de graviers nettoyés est souvent difficile. De plus, l'impact direct de cette méthode sur l'hydraulique et la capacité de transport de la rivière est souvent

considérable. En ajoutant localement une certaine quantité de sédiments dans 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 exemple des zones d'érosion ou de déposition de sédiments inhabituelles.

### **3.12 Exemples de la combinaison de plusieurs techniques**

Au tout début des années 1940, plusieurs techniques de nettoyage ont été appliquées 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. La technique utilisée est en fait une combinaison de deux techniques, soit l'ajout de déflecteurs à une méthode de scarification (White, 1942) effectuée sur la rivière à des endroits où l'espèce a déjà frayé. Les observations ont démontré que les sites nettoyés étaient largement utilisés par l'espèce concernée lors de la reproduction (White, 1942).

En 1996, Avery a voulu tester l'efficacité d'une seule trappe à sédiments comparativement à une combinaison d'une ou de plusieurs trappes avec l'ajout d'un seuil situé juste en aval de cette(ces) trappe(s). Il a testé l'efficacité de ces deux méthodes en se basant sur l'augmentation ou non de la densité de truites brunes d'âge 0 sur trois rivières du Wisconsin. Le premier site était caractérisé par la construction d'une seule trappe, le second, de deux trappes consécutives et d'un seuil et le dernier, d'une trappe et d'un seuil (figure 3.6). Les résultats ont démontré que ni la trappe et ni la combinaison des trappes et des seuils n'étaient significativement efficaces pour augmenter le recrutement naturel de truites brunes. Avery (1996) croit que le peu de résurgence d'eau provenant des profondeurs du lit au printemps expliquerait plutôt ce faible recrutement. Cette caractéristique aurait préséance sur la composition du gravier lors de la sélection des sites de fraie pour ce qui est de la truite brune et de la plupart des autres ombles (Avery, 1996). Une autre théorie présentée par Avery (1996) afin d'expliquer l'inefficacité de

sa méthode correspond au phénomène de ‘‘homing’’ des salmonidés, qui consiste en ce que les géniteurs retournent traditionnellement aux même sites de fraie et n'utilisent pas nécessairement de nouveaux sites, même si ces derniers sont potentiellement plus favorables à la reproduction.

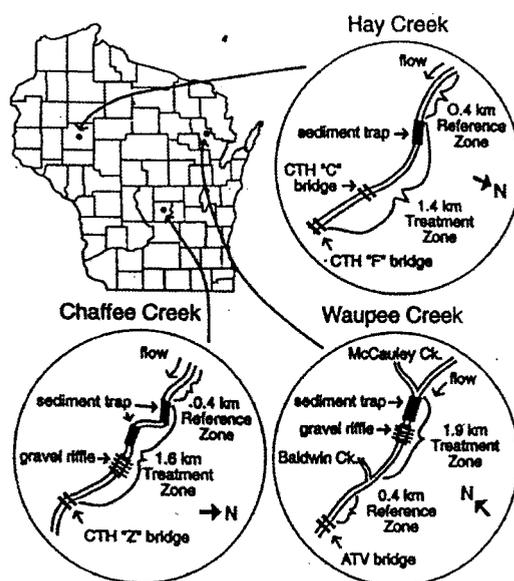


Figure 3.6 Localisation des seuils et trappes à sédiments sur les trois sites à l'étude (Tirée de Avery, 1996).

Récemment, Rubin *et al.* (2004) publiaient les résultats d'un suivi de sept ans (i.e. de 1992 à 1999) de 242 sites de fraie artificiels construits entre 1978 et 1992 dans quatre rivières de Gotland en Suède. Leur méthode consistait tout d'abord à creuser une trappe à sédiments en amont du site à aménager. Par la suite, un déflecteur en V pointant vers l'aval était construit et un rondin de bois était installé à la pointe du V afin de créer une chute d'eau (figure 3.7). En aval de la pointe du déflecteur, un chenal était construit afin de concentrer l'écoulement et créer ainsi des abris en périphérie des berges pour l'espèce concernée (i.e. *Salmo trutta*). En amont du barrage, une couche de gravier grossier était déposée sur le lit du cours d'eau et ensuite recouvert d'une couche de gravier correspondant à la distribution de taille d'un substrat de fraie. Les résultats ont démontré

que ce type d'aménagement était avantageux, car les succès de survie de l'espèce concernée étaient généralement beaucoup plus élevés dans le substrat de fraie artificiel, soit plus de 60 %, que dans le substrat de reproduction des habitats naturels, soit moins de 45 % (Rubin *et al.*, 2004). Par contre, l'entretien annuel de ce type d'aménagement est nécessaire à son bon fonctionnement. Précédemment chaque période de fraie, la trappe à sédiments doit être vidée et de nouvelles quantités de graviers doivent être ajoutées sur le site (Rubin *et al.*, 2004).

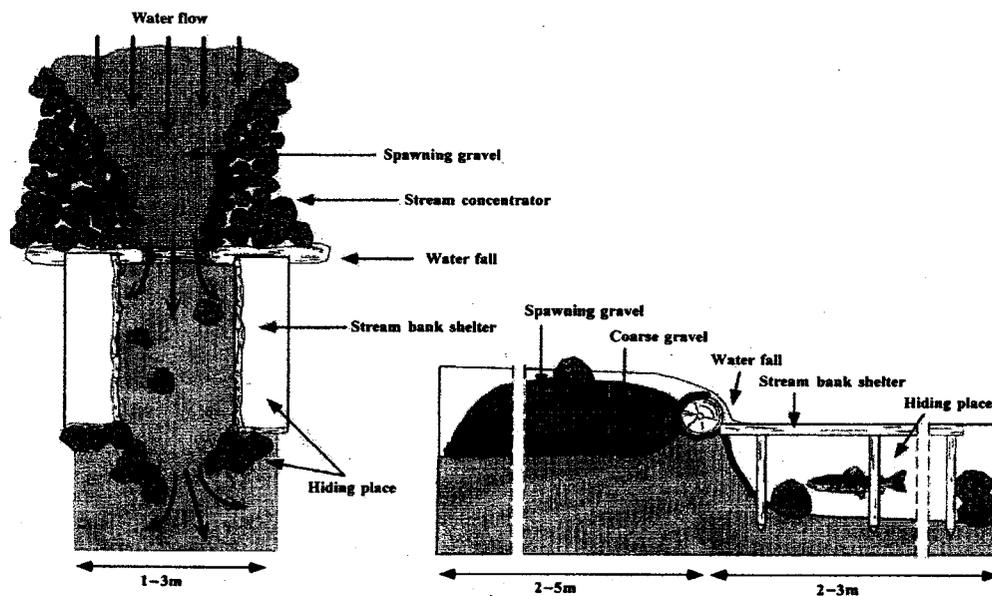


Figure 3.7 Site de fraie artificiel typique, Gotland (Suède) (Tirée de Rubin *et al.*, 2004).

### 3.13 Conclusion, lacunes et nécessité d'amélioration

Cette revue de littérature permet de constater que plusieurs appareils ou aménagements de nettoyage existent, mais que la majorité d'entre eux sont complexes, imposants et difficiles à utiliser ou à installer en rivière. Le coût associé à plusieurs de ces techniques de nettoyage est souvent élevé, car elles nécessitent une importante main-d'œuvre et/ou l'utilisation d'une source d'énergie pour fonctionner. En résumé, peu de méthodes

simples, efficaces et peu coûteuses sont actuellement disponibles. Cette revue de littérature expose aussi plusieurs échecs de projets de nettoyage ou d'impacts négatifs liés à l'utilisation de certains appareils qui sont fréquemment dus à un manque de compréhension des processus géomorphologiques et hydrauliques des rivières. Il est nécessaire de remédier à ces lacunes afin de tenter de rehausser l'habitat physique de fraie des salmonidés pour améliorer le succès de reproduction.

## 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) : 447-458.
- Allan, A.F. et Frostick, L. (1999). Framework dilation, winnowing and matrix particle size: the behaviour of some sand-gravel mixtures in a laboratory flume. *Journal of Sedimentary Research* (69), no. 1 : 21-26.
- Allen, J.R.L. (1970). Physical processes of sedimentation. Eds. : Sutton, J. et Watson, J.V. George Allen and Unwin, London. 248 pages.
- Andrew, F.J. (1974). A technique for cleaning spawning gravel. *Inter. Paci. Salmon Fish. Comm.* : 195-200.
- Argent, D.G. et Flebbe, P.A. (1999). Fine sediment effects on brook trout eggs in laboratory streams. *Fisheries Research* (39) : 253-262.
- Armstrong, J.D., Kemp, P.S., Kennedy, M.L. et Milner, N.J. (2003). Habitat requirements of Atlantic salmon and brown trout in rivers and streams. *Fisheries Research* (62) : 143-170.
- 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) : 282-293.
- Baxter, C.V. et Hauer, F.B. (2000). Geomorphology, hyporheic exchange, and selection of spawning habitat by bull trout (*Salvelinus confluentus*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (57) : 1470-1481.
- Baxter, C., Hauer, F.B. et Woessner, W.W. (2003). Measuring groundwater-stream water exchange: new techniques for installing minipiezometers and estimating hydraulic conductivity. *Transactions of the American Fisheries Society* (132) : 493-502.
- Beland, K.F., Jordans, R.M. et Meister, A.L. (1982). Water depth and velocity preferences of spawning Atlantic salmon in Maine rivers. *North American Journal of Fisheries Management* (2) : 11-13.

- Beltaos, S., Calkins, D.J., Gatto, L.W., Prowse, T.D., Reedyk, S., Scrimgeour, G.J. et Wilkins, S.P. (1993). Physical effects of river ice. Dans : Prowse, T.D. et Gridley, N.C. (eds.) *Environmental aspects of river ice*. Chapitre 2, pp. 31-60.
- Bernatchez, L. et Giroux, M. (1991). Guide des poissons d'eau douce du Québec et leur distribution dans l'Est du Canada. Éditions Broquet. Québec. 304 pages.
- Bergeron, N., Bérubé, F., Pouliot, M.-A. et Lapointe, M. (2002). Études des impacts des pratiques forestières sur la conservation de la ressource saumon dans le bassin-versant de la rivière Cascapédia : effet des limons sur la survie des embryons de saumon atlantique. *Rapport du Programme de mise en valeurs des ressources du milieu forestier, Volet 1- expérimentation, Ministère des Ressources Naturelles du Québec*. 17 pages.
- Beschta, R.L. et Jackson, W.L. (1979). The intrusion of fine sediments into a stable gravel bed. *Journal of the Fisheries Resource Board of Canada* (36) : 204-210.
- Boivin, J. (1998). Restauration et aménagement des habitats pour l'omble 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'omble 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 », 27-28 octobre 1998, Québec. pp. 1-5.
- Boivin, J. (2000). Commentaires personnels lors d'un entretien. Société de la Faune et des Parcs du Québec (FAPAQ).
- Bond, N.R. (2002). A simple device for estimating rates of fine sediment transport along the bed of shallow streams. *Hydrobiologia* (468) : 155-161.
- Boon, P.J. (1988). The impact of river regulation on invertebrate communities in the U.K. *Regulated Rivers: Research and Management* (2) : 389-409.
- Carling, P.A. (1984). Deposition of fine and coarse sand in an open-work gravel bed. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (41) : 263-270.

- Carling, P.A. et McCahon, C.P. (1987). Natural siltation of brown trout (*Salmo trutta L.*) spawning gravels during low-flow conditions. Dans : Craig, J.F. et Kemper, J.B. (eds.) *Regulated streams: Advances in ecology*. Plenum Press, New York. pp. 229-244.
- 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 : 1-21.
- Church, M.A., McLean, D.G. et Wolcott, J.F. (1987). River bed gravels: sampling and analysis. Dans : Thorne, C.R., Bathurst, J.C. et Hey, R.D. (eds.) *Sediment transport in gravel-bed rivers*. John Wiley & Sons Ltd. pp. 43-89.
- Clarke, K.D., Scruton, D.A. et McCarthy, J.H. (1998). The effect of logging and road construction on fine sediment accumulation in streams of the Copper Lake watershed, Newfoundland, Canada: initial observations. Dans : *Forest-fish conference: land management practices affecting aquatic ecosystems*. Proceedings of the Forest-Fish Conference, 1-4 mai 1996, Calgary, Alberta. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, North. For. Cent. (Edmonton, Alberta). Inf. Rep. NOR-X-356. pp. 353-360.
- Coble, D.W. (1961). Influence of water exchange on dissolved oxygen in redds on survival of steelhead trout embryos. *Transactions of the American Fisheries Society* (90) : 469-474.
- Cooper, A.C. (1965). The effect of transported stream sediments on the survival of sockeye and pink salmon eggs and alevins. *Int. Pacific Salmon Comm. Bulletin* (18), 71 pages.
- Crisp, D.T. et Carling, P.A. (1989). Observations on siting, dimensions and structure of salmonid redds. *Journal of Fish Biology* (34) : 119-134.
- Curry, R.A. et Noakes, L.G. (1995). Groundwater and the selection of spawning sites by brook trout (*Salvelinus fontinalis*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (52) : 1733-1740.
- DeVries, P. (1997). Riverine salmonid egg burial depths: review of published data and implications for scour studies. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (54) : 1685-1698.
- Dingman, S.L. (1984). *Fluvial hydrology*. Freeman and Company. New York. 383 pages.
- Diplas, P. et Parker, G. (1992). Deposition and removal of fines in gravel-bed streams. Dans : Billi, P., Hey, R.D., Thorne, C.R. et Tacconi, P. (eds.) *Dynamics of gravel-bed rivers*. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, U.K.

- Everest, F.L., Beschta, R.L., Scrivener, J.C., Koski, K.V., Sedell, J.R. et Cederholm, C.J. (1987). Fine sediment and salmonid production: a paradox. Dans : Salo, E.O. et Cundy, T.W. (eds.) *Streamside management: forestry and fishery interactions*. University of Washington, College of forest resources, Cont. No. 57. Seattle. pp. 98-142.
- Everest, F.H., Reeves, G.H. et Sedell, J.R. (1989). Salmonid habitat: new beginnings through enhancement, but not without uncertainty, risk and failure. Proceedings of Wild Trout, Steelhead and Salmon in the 21<sup>st</sup> Century. Portland, Oregon, 19 juillet 1986, pp. 9-19.
- Fletcher, W.K., McLean, W.E. et Sweeten, T. (1995). An instrument to monitor infiltration of fine sediment into stable gravel stream beds. *Aquacultural Engineering* (14), no. 4 : 289-296.
- Fleming, I.A. (1996). Reproductive strategies of Atlantic salmon: ecology and evolution. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* (6) : 379-416.
- 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) : 182-197.
- Frostick, L.E., Lucas, P.M. et Reid, I. (1984). The infiltration of fine matrices into coarse-grained alluvial sediment and its implications for stratigraphical interpretation. *Journal of the Geological Society, London* (141) : 955-965.
- Fusilier, L. et Edds, D. (1995). An artificial riffle restored habitat for the threatened Neosho Madtom. *North American Journal of Fisheries Management* (15) : 499-503.
- Garside, E.T. (1966). Effects of oxygen in relation to temperature on the development of embryos of brook trout and rainbow trout. *Journal of the Fisheries Resource Board of Canada* (23) : 1121-1131.
- Geist, D.R. (1999). Hyporheic discharge of river water into fall chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) spawning areas in the Hanford Reach, Columbia River. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (57) : 1647-1656.
- Grost, R.T., Wesche, T.A., Young, M.K., Hubert, W.A. et Hasfurther, V.R. (1988). Evaluation of procedures to measure intragravel water velocity in streambeds. Technical report. WWRC-88-03. US Geological Survey, pp. 1-23.
- Groves, K. (2000). Commentaires personnels par courriel. BC Hydro.

- Gustafson-Greenwood, K.I. et Moring, J.R. (1991). Gravel compaction and permeabilities in redds of Atlantic salmon. *Aqua. Fisheries Management* (22) : 537-540.
- Hansen, E.A., 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.
- Harmor, T. et Garside, E.T. (1976). Developmental rates of embryos of Atlantic salmon, *Salmo salar L.*, in response to various levels of temperature, dissolved oxygen and water exchange. *Canadian Journal of Zoology* (54) : 1912-1917.
- Harris, G.S. (1973). A simple egg box planting technique for estimating the survival of eggs deposited in stream gravel. *Journal of Fish Biology* (5) : 85-88.
- Harvey, J.W. et Bencala, K.E. (1993). The effect of streambed topography on surface-subsurface water exchange in mountain catchments. *Water Resources Research* (29), no. 1 : 89-98.
- Harshbarger, T. J. et Porter, P.E. (1982). Embryo survival and fry emergence from two methods of planting brown trout eggs. *North American Journal of Fisheries Management* (2) : 84-89.
- Hausle, D.A. et Coble, D.W. (1976). Influence of sand in redds on survival and emergence of brook trout (*Salvelinus fontinalis*). *Transactions of the American Fisheries Society* (1) : 57-63.
- 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. Dans : Alabaster, J.S. (ed.) *Habitat Modification and Freshwater Fisheries*. EIFAC Proc., FAO, Butterworths, London-Boston. pp. 116-123.
- 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.
- Ingendahl, D. (2001). Dissolved oxygen concentration and emergence of sea trout fry from natural redds in tributaries of the River Rhine. *Journal of Fish biology* (58) : 325-341.

- Jobson, H.E. et Carey, W.P. (1989). Interaction of fine sediment with alluvial streams. *Water Resources Research* (25) : 135-140.
- Kamler, E. (1992). Early life history of fish: an energetic approach. Chapman & Hall, Fish and Fisheries Series. London. 267 pages.
- Kondolf, M. (2000). Assessing salmonid spawning gravel quality. *Transactions of the American Fisheries Society* (129) : 262-281.
- Kondolf, G.M., 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 : 927-935.
- Kondolf, G.M. et Wilcock, P.R. (1996). The flushing flow problem: defining and evaluating objectives. *Water Resources Research* (32), no. 8 : 2589-2599.
- Kondolf, G.M., Sale, M.J. et Wolman, M.G. (1993). Modification of fluvial gravel size by spawning salmonids. *Water Resources Research* (29), no. 7 : 2265-2274.
- 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* (125), no. 6 : 899-912.
- Koudou, T., Takeshita, N., Nakazono, A. et Kimura, S. (2001). Egg survival in a fluvial population of Masu salmon in relation to intragravel conditions in spawning redds. *Transactions of the American Fisheries Society* (130) : 969-974.
- Lachance, S. et Dubé, M. (2004). A new tool for measuring sediment accumulation with minimal loss of fines. *North American Journal of Fisheries Management* (24) : 303-310.
- Lacroix, G.L. (1985). Survival of eggs and alevins of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in relation to the chemistry of interstitial water in redds in some acidic streams of Atlantic Canada. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (42) : 292-299.
- Lapointe, M.F., Bergeron, N.E., Bérubé, F., Pouliot, M-A. et Johnston, P (2004). Interactive effects of substrate sand and silt contents, redd-scale hydraulic gradients and interstitial velocities on egg to emergence survival of Atlantic salmon. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (61) : 2271-2277.

- Leeder, M.R. (1982). *Sedimentology: process and product*. George Allen & Unwin Ltd. London. 344 pages.
- Lisle, T.E. (1989). Sediment transport and resulting deposition in spawning gravels, north coastal California. *Water Resources Research* (25) : 1303-1319.
- Lisle, T.E. et Eads, R.E. (1991). Methods to measure sedimentation of spawning gravels. US Forest Service Resources, Note, PSW-411. 8 pages.
- Lisle, T.E. et Lewis, J. (1992). Effects of sediment transport on survival of salmonid embryos in a natural stream: a simulation approach. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (49) : 2337-2344.
- Lisle, T.E. et Hilton, S. (1999). Fine bed material in pools of natural gravel bed channels. *Water Resources Research* (35), no. 4 : 1291-1304.
- Lotspeich, F.B. et Everest, F.H. (1981). A new method for reporting and interpreting textural composition of spawning gravel. Research note PNW-369. U.S. forest and Range Service, Pacific Northwest Experiment Station. 12 pages.
- MacKenzie, C. et Moring, J.R. (1988). Estimating survival of Atlantic salmon during the intragravel period. *North American Journal of Fisheries Management* (8) : 45-49.
- MAPAQ (1996). Guide d'élevage des salmonidés. Fascicule 3 : Reproduction, incubation et alevinage, Chapitre 3.5 : L'incubation, pp. 38-44.
- Marchant, R. (1989). Changes in the benthic invertebrate communities of the Thomson River, Southeastern Australia, after dam construction. *Regulated Rivers: Research and Management* (4) : 71-89.
- Maret, T.R., Burton, T.A., Harvey, G.W. et Clark, W. H. (1993). Field testing of new monitoring protocols to assess brown trout spawning habitat in an Idaho stream. *North American Journal of Fisheries Management* (13) : 567-580.
- 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* (3), no. 1 : 16-18.
- Moir, H.J., Soulsby, C. et Youngson, A. (1998). Hydraulic and sedimentary characteristics of habitat utilized by Atlantic salmon for spawning in the Girnock Burn, Scotland. *Fisheries Management and Ecology* (5) : 241-254.

- Montgomery, D. R., Buffington, J.M., Peterson, N.P., Schuett-Hames, D. et Quinn, T.P. (1996). Stream-bed scour, egg burial depths and the influences of salmonid spawning on bed surface mobility and embryo survival. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (53) : 1061-1070.
- Moring, J.R. (1982). Decrease in stream gravel permeability after clear-cut logging: an indication of intragravel conditions for developing salmonid eggs and alevin. *Hydrobiologia* (88) : 295-298.
- O'Connor, W.C.K. et Andrew, T.E. (1998). The effects of siltation on Atlantic salmon, *Salmo salar* L., embryos in the river Bush. *Fisheries Management and Ecology* (5) : 393-401.
- Olmsted, R. Communication d'un rapport par courrier électronique. Chapitre 5 : Incubation habitat enhancement. BC Hydro.
- Parrish, D.L., Behnke, R.J., Gephard, S., McCormick, S. et Reeves, G. (1998). Why aren't there more Atlantic salmon? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (55), suppl.1 : 281-287.
- Payne, B.A. et Lapointe, M.F. (1997). Channel morphology and lateral stability : effects on distribution of spawning and rearing habitat for Atlantic salmon in a wandering cobble-bed river. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (54), no.11 : 2627-2636.
- Peterson, R.H. (1978). Physical characteristics of Atlantic salmon spawning gravels in some New Brunswick streams. Fisheries and Oceans Canada, biological station, *Fisheries and marine service technical report* (785), St-Andrews, New Brunswick.
- Peterson, R.H. et Metcalfe, J.L. (1981). Emergence of Atlantic salmon fry from gravels of varying composition: a laboratory study. *Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences* (1020). 28 pages.
- Petts, G.E., Thoms, M.C., Brittan, K. et Atkin, B. (1989). A freeze-coring technique applied to pollution by fine sediments in gravel-bed rivers. *The Science of the Total Environment* (84) : 259-272.
- Petts, G. et Calow, P. (eds.). (1996). River flows and channel forms. Blackwell Science. 262 pages.

- 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. *Transactions of the American Fisheries Society* (118) : 274-283.
- Pollard, R.A. (1955). Measuring seepage through salmon spawning gravel. *Journal of the Fisheries Resource Board of Canada* (12), no. 5 : 706-741.
- Prowse, T.D. (1993). Suspended sediment concentration during river ice break-up. *Canadian Journal of Civil Engineering* (20) : 872-875.
- Prowse, T.D. (1994). Environmental significance of ice to stream flow in cold regions. *Freshwater Biology* (32) : 241-259.
- Reiser, D.W. (1999). Sediment in gravel bed rivers: ecological and biological considerations. Dans : Klingeman, P.C., Beschta, R.L., Komar, P.D. et Bradley, J.B. (eds.) *Gravel-Bed Rivers in the Environment*. Water Resources Publications, High land Ranch, Colorado. pp. 199-228.
- Reiser, D.W. et White, R.G. (1988). Effects of two sediment size classes on survival of steelhead and chinook salmon eggs. *North American Journal of Fisheries Management* (8) : 432-437.
- Rennie, C.D. et Millar, R.G. (2000). Spatial variability of stream bed scour and fill: a comparison of scour depth in chum salmon (*Oncorhynchus keta*) redds and adjacent bed. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (57) : 928-938.
- Rhodes, J.J. et Purser, M.D. (1998). Overwinter sedimentation of clean gravels in simulated redds in the upper Grande Ronde River and nearby streams in northeastern Oregon, USA: implications for the survival of threatened spring Chinook salmon. Dans : *Forest-fish conference: land management practices affecting aquatic ecosystems*. Proceeding of the Forest-Fish Conference, 1-4 mai 1996, Calgary, Alberta. Natural Resource Canada, Canadian Forest Service, North. For. Cent. (Edmonton, Alberta). Inf. Rep. NOR-X-356. pp. 403-412.
- Richards, C., Host, G.H. et Arthur, J.W. (1993). Identification of predominant environmental factors structuring stream macroinvertebrate communities within a large agricultural catchment. *Freshwater Biology* (29) : 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)
- Rubin, J.-F. (1995). Estimating the success of natural spawning of salmonids in streams. *Journal of Fish Biology* (46) : 603-622.
- Rubin, J.-F., Glimsäter, C. et Jarvi, T. (2004). Characteristics and rehabilitation of the spawning habitats of the sea trout, *Salmo trutta*, in Gotland (Sweden). *Fisheries Management and Ecology* (11) : 15-22.
- Scott, W.B. et Crossman, E.J. (1974). *Les poissons d'eau douce du Canada*. Ministère de l'environnement. Ottawa. Bulletin 184. 1026 pages.
- Scrivener, J.C. (1988). Two devices to assess incubation survival and emergence of salmonid fry in an estuary streambed. *North American Journal of Fisheries Management* (8) : 248-258.
- Scrivener, J.C. et Brownlee, M.J. (1989). Effects of forest harvesting on spawning gravel and incubation survival of chum (*Oncorhynchus keta*) and coho salmon (*O. kisutch*) in Carnation Creek, British Columbia. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (46) : 681-696.
- Sear, D.A. (1993). Fine sediment infiltration into gravel spawning beds within a regulated river experiencing floods: ecological implications for salmonids. *Regulated Rivers : Research and Management* (8) : 373-390.
- 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) : 477-486.
- Shapley, S.P. et Bishop, D.M. (1965). Sedimentation in a salmon stream. *Journal of the Fisheries Resource Board of Canada* (22) : 919-928.
- Shields, H.J. (1968). Riffle sifter for Alaska salmon gold. *Yearbook of Agriculture*. Separate No. 3586. pp : 204-208.
- Silver, S.T., Warren, C.E., Doudoroff, P. (1963). Dissolved oxygen requirements of developing steelhead trout and chinook salmon embryos at different water velocities. *Transactions of the American Fisheries society* (92), no. 4 : 327-343.

- Soulsby, C., Youngson, A.F., Moir, H.J. et Malcom, I.A. (2001). Fine sediment influence on salmonid spawning habitat in a lowland agricultural stream: a preliminary assessment. *The Science of the Total Environment* (265) : 295-307.
- Sowden, T.K. et Power, G. (1985). Prediction of rainbow trout embryo survival in relation to groundwater seepage and particle size of spawning substrates. *Transactions of the American Fisheries Society* (114) : 804-812.
- St-Onge, I., Bérubé, P. et Magnan, P. (2001). Effets des perturbations naturelles et anthropiques sur les milieux aquatiques et les communautés de poissons de la forêt boréale. *Nat. Can.* (125) : 81-95.
- Stuart, T.A. (1953). Water currents through permeable gravels and their significance to spawning salmonids. *Nature* (172) : 407-408.
- 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) : 123-135.
- Thibodeaux, L.J. et Boyle, J.D. (1987). Bedform generated convective transport in bottom sediment. *Nature* (325) : 341-343.
- Thurrow, R. et King, J. (1991). Effects of fine sediment on fish populations. Proceedings of the Federal Inter-agency Sedimentation conference. Intermountain Research Station, Forest Service, Department of Agriculture, Idaho, U.S. Vol. 2 : 11-49 à 11-56.
- Turnpenny, A.W.H. et Williams, R. (1980). Effects of sedimentation on the gravels of an industrial river system. *Journal of Fish Biology* (17) : 681-693.
- Vaux, W.G. (1962). Interchange of stream and intragravel water in a salmon spawning riffle. USDI Fish and wildlife service. Special Scientific Report. Fisheries no. 405. Washington, D.C.
- Vaux, W.G. (1968). Intragravel flow and interchange of water in a stream bed. *Bulletin of the U.S. Fish and Wildlife Service* (66), no. 3 : 479-489.
- Weaver, T.M. et Fraley, J.J. (1993). A method to measure emergence success of westslope cutthroat trout fry from varying substrate compositions in a natural stream channel. *North American Journal of Fisheries Management* (13) : 817-822.

- Wesche, T.A., Reiser, D.W., Hasfurther, V. R., Hubert, W.A. et Skinner, Q.D. (1989). New technique for measuring fine sediment in streams. *North American Journal of Fisheries Management* (9) : 234-238.
- White, H.C. (1942). Atlantic salmon redds and artificial spawning beds. *Journal of the Fisheries Resource Board of Canada* (6), no. 1. pp. 37-44.
- Wickett, W.P. (1954). The oxygen supply to salmon eggs in spawning beds. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* (11), no. 6: 933-953.
- Wood, P.J. et Armitage, P.D. (1997). Biological effects of fine sediment in the lotic environment. *Environmental Management* (21), no. 2: 203-217.
- Wood, P.J. et Armitage, P.D. (1999). Sediment deposition in a small lowland stream-management implications. *Regulated Rivers: Research and Management* (15) : 199-210.
- Wu, F.-C. (2000). Modeling embryo survival affected by sediment deposition into salmonid spawning gravels: application to flushing flow prescriptions. *Water Resources Research* (36), no. 6: 1595-1603.
- 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.

## **CHAPITRE 4**

### **Contribution de la thèse**

---

#### **4.1 Contribution de la candidate**

La part effective du travail fourni par la candidate à l'ensemble des travaux présentés dans les chapitres 5, 6 et 7 doit être exposée étant donné que plusieurs auteurs ont participé à l'élaboration des différents articles scientifiques et rapports. Mentionnons que l'ordre des auteurs a été déterminé selon le degré d'implication. Pour chacun des articles et rapports, la candidate a réalisé le montage expérimental, la collecte des données, la compilation et l'analyse des résultats ainsi que la rédaction des textes. Les autres auteurs ont accompli une tâche de supervision soit sur le terrain ou lors de l'analyse des données et de la rédaction. Plus particulièrement, la conception et la fabrication des différents appareils de terrain (cube d'infiltration et traîneau-défecteur) a été effectué par Francis Bérubé (professionnel de recherche). De plus, lors des nombreuses périodes d'échantillonnage, son support a été indispensable. L'édition finale des chapitres 5 et 6 a été effectuée respectivement par Normand Bergeron (directeur) et Michel Lapointe (co-directeur) afin d'assurer la qualité du texte en anglais.

#### **4.2 Contribution du chapitre 5**

Malgré l'aspect technique de l'article présenté au chapitre 5, il constitue un élément fondamental à cette thèse, car il était nécessaire de développer une nouvelle technique d'échantillonnage fiable qui permettrait d'échantillonner simultanément l'environnement dans lequel se développent les embryons et l'état de ces derniers pendant la période d'incubation afin de poursuivre les recherches à ce sujet, qui constitue en fait le corps de la thèse, soit le chapitre 6.

Bien que, depuis plusieurs décennies, la littérature fait état de l'impact négatif de la présence excessive de sédiments fins dans le substrat sur la survie des embryons de salmonidés (Carling et McCahon, 1987; Chapman, 1988; Kondolf, 2000; Wood et Armitage, 1997), aucune technique d'échantillonnage ne permettait de documenter ces deux variables simultanément dans un environnement qui recrée les conditions d'un nid naturel de salmonidé. Les nombreux chercheurs intéressés par cette problématique s'en sont tenus à combiner des techniques déjà existantes qui avaient été développées spécifiquement, soit pour étudier la survie des embryons (Tappel et Bjornn, 1983; Lacroix, 1985; Mackenzie et Moring, 1988; Reiser and White, 1988; Scrivener, 1988; Maret *et al.*, 1993; Weaver and Fraley, 1993), soit pour caractériser l'état du substrat (Lisle et Eads, 1991; Fletcher *et al.*, 1995; Payne et Lapointe, 1997; Soulsby *et al.*, 2001; Bond, 2002; Lachance et Dubé, 2004). Il n'est pas surprenant que ces techniques ne soient pas idéales pour l'échantillonnage des deux variables simultanément, car ces dernières n'avaient pas été développées spécifiquement pour ce type d'échantillonnage. Voilà pourquoi il était nécessaire de développer une nouvelle technique fiable et efficace qui pourrait permettre ce type d'échantillonnage, tout en ne possédant pas les inconvénients des autres méthodes existantes.

Notre nouvelle technique, soit les cubes d'infiltration, est inspirée des sacs d'infiltration développée par Sterling (voir chapitre 2 pour les détails) (Lisle et Eads, 1991). Cette technique a été modifiée en augmentant le volume d'échantillonnage et en ajoutant une structure métallique au sac d'infiltration. Cette nouveauté était essentielle en ce qu'elle permet de déposer avec confiance des œufs dans le substrat. La structure métallique offre un environnement restreint qui facilite la mise en place des œufs dans le substrat et qui assure leur récupération lors de l'extraction du sac. En effet, cette structure permet de guider le sac lors de l'extraction et ainsi récolter à la fois les embryons et le substrat dans lequel ces derniers se sont développés durant la période d'incubation.

Un autre avantage considérable de la nouvelle technique est qu'elle n'est pas limitante, étant donné qu'elle ne possède pas de parois. Ainsi, elle laisse libre cours aux processus hydrauliques et sédimentologiques qui se produisent dans le substrat en milieu naturel, ce que plusieurs techniques existantes ne permettraient pas (Lisle et Eads, 1991; Fletcher *et al.*, 1995; Soulsby *et al.*, 2001 ; Bond, 2002; Lachance et Dubé, 2004). Cette technique a été développée dans le but de reproduire le plus fidèlement possible les caractéristiques morpho-sédimentologique des nids de saumon atlantique afin d'effectuer un suivi de l'infiltration des sédiments fins dans le substrat et de déterminer l'impact sur la survie des embryons. La nouvelle technique est versatile, car elle peut être utilisée pour l'étude d'autres espèces de salmonidés (e.g. la truite) ou pour effectuer uniquement l'échantillonnage des caractéristiques physiques du substrat ou de l'infiltration des sédiments fins sur une certaine période de temps (e.g. pour analyser l'effet de la mise en place d'un ponceau ou de toute autre structure causant la dégradation éventuelle du substrat d'un cours d'eau) sans pour autant faire des analyses de la survie en milieu naturel.

Une autre des qualités majeures de cette nouvelle technique, c'est qu'elle permet d'échantillonner aisément sous couvert de glace. La majorité des techniques existantes ne permettent pas d'échantillonner en hiver. Étant donné que la majorité des rivières supportant des populations de salmonidés sont caractérisées par la présence d'un couvert de glace pour une grande portion de la période d'incubation, il était nécessaire que la nouvelle technique puisse permettre l'échantillonnage hivernal afin d'effectuer un suivi ponctuel sur la totalité de cette période. Dans son ensemble, cette nouvelle technique constitue une importante innovation technologique autant dans le domaine de la biologie aquatique que dans celui de la géomorphologie fluviale.

Le contenu de ce chapitre a été publié sous forme d'article scientifique dans une revue avec comité de lecture et a aussi été présenté lors d'un congrès.

**Levasseur, M., Bérubé, F. et Bergeron, N.** (2006). A field method for the concurrent measurement of fine sediment content and embryo survival in artificial salmonid redds. *Earth Surface Processes and Landforms* (31): 526-530.

**Levasseur, M., Bérubé, F. et Bergeron, N.** (2002). Mesure de l'infiltration de sédiments fins dans le substrat des rivières : développement d'une nouvelle technique d'échantillonnage. Présentation orale dans le cadre de la Journée Sciences de la Terre, Université Laval, Québec.

### **4.3 Contribution du chapitre 6**

La nouvelle technique d'échantillonnage a été développée dans le but d'effectuer un suivi de l'infiltration des sédiments fins dans des nids artificiels de saumon atlantique et d'en évaluer l'impact sur la survie des embryons. Aucune étude n'avait encore caractérisé les variations temporelles de l'état du substrat de nids à différents moments sur l'ensemble de la période d'incubation. L'effort d'échantillonnage a été considérable, étant donné que plusieurs sorties de quelques semaines sur le terrain ont été nécessaires afin d'effectuer l'échantillonnage ponctuel. De plus, le suivi a été effectué sur deux périodes d'incubation consécutives, ce qui a permis d'effectuer une comparaison inter-annuelle de l'infiltration des sédiments fins et de la survie des embryons selon les conditions climatiques et les processus géomorphologiques spécifiques à chacune des années.

La contribution la plus importante de ce chapitre provient des résultats de l'impact des différentes classes de sédiments fins sur la survie des embryons de saumon atlantique. Les résultats de nos analyses ont démontré qu'il y avait une relation significative seulement entre le pourcentage de survie à l'éclosion et les deux fractions de sédiments les plus fins, soit les silts et les sables très fins. Ceci suggère qu'il est essentiel d'analyser les fractions les plus fines lors d'études portant sur la problématique traitant de la survie des embryons de salmonidés. Les fractions plus grossières ainsi que les différents indices de qualité de substrat peuvent parfois dissimuler l'effet des fractions plus fines, car la proportion de ces

dernières dans la distribution granulométrique typique du substrat est très faible. Armstrong *et al.* (2003), avaient vu juste en soulignant la pertinence d'éventuelles études portant sur l'analyse de la dynamique des sédiments  $< 0.250$  mm. Ce nouvel apport est considérable autant pour les chercheurs que les gestionnaires de rivières qui tentent de mieux comprendre l'effet néfaste des sédiments fins sur la survie des salmonidés ou d'autres espèces. En bout de ligne, le but est de remédier à ce problème afin d'améliorer la reproduction de l'espèce qui est présentement vulnérable dans certaines régions.

Une autre contribution importante de ce chapitre concerne la dynamique spatio-temporelle de l'infiltration des sédiments fins dans les nids artificiels de saumon atlantique. Grâce au suivi effectué sur deux périodes d'incubation, il a été possible de conclure que, même si les conditions hydrauliques de chacune des années à l'étude étaient quelques peu différentes<sup>2</sup>, l'infiltration dans le substrat des deux fractions de sédiments fins les plus dommageables pour la survie des embryons s'effectuait plus particulièrement pendant la période hivernale. Il n'est pas étonnant que cette dernière soit caractérisée par de l'infiltration de sédiments fins. Étant donné que les conditions d'écoulement ainsi que le transport de sédiments sont faibles durant cette période, seul le transport en suspension des particules les plus fines peut avoir lieu. Par contre, nos résultats ont aussi démontré que lors de la crue de printemps, il y avait aussi de l'infiltration de sédiments fins dans le substrat, mais que cette dynamique était beaucoup plus complexe que lors de la période hivernale. Dans certaines zones des sites d'étude, la crue permettait de purger considérablement le substrat d'une certaine quantité de sédiments très fins, tandis que sur d'autres zones, elle favorisait l'infiltration. Ce résultat est intéressant, car il suggère un processus de nettoyage naturel du substrat des nids lors de la crue de printemps. Ce résultat aurait probablement été dissimulé si le plan d'échantillonnage n'avait pas permis d'échantillonner à plusieurs moments lors de l'ensemble de la période d'incubation. Ces résultats illustrent bien la complexité de la dynamique temporelle de l'infiltration de

---

2 Les principales différences sont la durée du couvert de glace stable, soit de mi-décembre à mi-avril (année 1) comparativement à début janvier jusqu'à fin mars (année 2) et qu'un seul événement de crue (i.e.  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ ) d'importance est survenu au printemps lors de l'année 1, comparativement à trois événements de plus faible intensité (i.e.  $< 200 \text{ m}^3/\text{s}$ ) lors de l'année 2. Enfin, lors de l'année 2, les crues d'automne ont été plus fréquentes et de plus fortes intensités.

sédiments fins dans le substrat de fraie de saumon atlantique durant l'ensemble de la période d'incubation, ce qui n'avait jusqu'à ce jour jamais été si précisément caractérisé. De plus, nos échantillons ont été récoltés à l'intérieur de nids artificiels représentant fidèlement un nid naturel de saumon atlantique et de ce fait, ces résultats sont tout à fait exclusifs et nouveaux.

L'originalité de notre plan d'échantillonnage a aussi permis de contribuer d'une autre façon à l'avancement des connaissances, mais cette fois concernant la dynamique spatiale de l'infiltration. En décortiquant les sites de fraie à l'étude en plusieurs zones distinctes selon leurs caractéristiques physiques (i.e. profondeur, vitesse et substrat), la comparaison de ces zones a permis de déterminer l'impact de la localisation spatiale de chacune d'elles sur la dynamique de l'infiltration. À notre connaissance, aucune étude portant sur l'effet des sédiments fins sur la survie des salmonidés n'avait encore présenté de résultats sur la dynamique spatiale de l'infiltration sur une frayère en caractérisant cette dynamique à plusieurs moments différents lors de la période d'incubation.

Une meilleure connaissance de la dynamique temporelle et spatiale de l'infiltration de sédiments fins est une contribution non négligeable à l'avancement de la science et plusieurs applications en découlent. En effet, les gestionnaires de rivières aimeraient bien connaître le meilleur moment pour agir sur un site de fraie et aussi à quel(s) endroit(s) spécifique(s) agir pour tenter d'améliorer de façon optimale la qualité de ces sites pour favoriser la reproduction de l'espèce.

Le contenu de ce chapitre a été publié sous forme d'article scientifique dans une revue avec comité de lecture et a aussi été présenté à trois occasions lors de différents congrès.

**Levasseur, M., Bergeron, N.E., Lapointe, M.F. et Bérubé, F. (2006).** Effects of silt and very fine sand dynamics in Atlantic salmon (*Salmo salar*) redds on embryo hatching success. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* (63): 1450-1459.

**Levasseur, M., Bergeron, N., Bérubé, F. et Lapointe, M. (2003).** Temporal dynamics of fine sediment infiltration within artificial Atlantic salmon redds : effects on embryo survival. Présentation orale dans le cadre du congrès de l'American Fisheries Society (AFS), Québec.

**Levasseur, M., Bérubé, F., Bergeron, N. et Lapointe, M. (2003).** Variations temporelles de l'infiltration des sédiments fins dans le substrat de fraie du saumon atlantique et impacts sur la survie des embryons (hiver 2001-2002). Présentation orale dans le cadre de la rencontre annuelle du CIRSA, Université Laval, Québec.

**Levasseur, M. Bérubé, F. et Bergeron, N. (2002).** Variations de l'infiltration de sédiments fins dans le substrat de fraie du saumon atlantique durant la période d'incubation (hiver 2000-2001). Présentation orale dans le cadre de la rencontre annuelle du CIRSA, Université Laval, Québec.

#### **4.4 Contribution du chapitre 7**

Le chapitre 7 est en fait la continuité des deux chapitres précédents. Étant donné qu'il est reconnu depuis longtemps que les sédiments fins sont nuisibles à la reproduction de salmonidés, l'amélioration physique des habitats de fraie dans le but de rétablir les populations est devenue de plus en plus populaire depuis les trente dernières années. Les projets sont d'échelles très variables, passant du nettoyage à l'installation de structures mineures jusqu'à la restructuration complète du lit ou des berges. La littérature fait état de plusieurs projets qui ont échoué (Frissell et Nawa, 1992) dû à un manque de suivi et/ou d'entretien des sites et structures, mais surtout en raison d'un manque flagrant de compréhension des processus géomorphologiques et hydrauliques des rivières. De plus, la majorité des techniques de nettoyage du substrat qui ont été développées sont souvent complexes et coûteuses. Un autre inconvénient est que l'usage d'une énergie supplémentaire et d'une importante main-d'œuvre sont souvent nécessaires à leur fonctionnement.

L'objectif du chapitre 7 était de concevoir une nouvelle technique de nettoyage qui ne possédait pas ces inconvénients. Les objectifs ont en majorité été atteints par le développement d'une nouvelle technique efficace, compacte, abordable et simple à utiliser. En effet, cette dernière ne nécessite aucune source d'énergie supplémentaire pour fonctionner, autre que la force de l'écoulement pour nettoyer le substrat de fraie ainsi que deux personnes pour assurer le bon fonctionnement de l'appareil.

Des travaux menés en laboratoire ont d'abord permis de tester l'effet du nouvel appareil sur les caractéristiques de l'écoulement. Les détails et résultats de ces travaux sont présentés au chapitre 7 ainsi qu'à l'annexe 1. Somme toute, les résultats ont indiqué qu'un angle d'inclinaison du déflecteur de l'appareil entre 30 et 40 degrés procurait les meilleurs bénéfices. D'autre part, des essais d'efficacité de ce nouvel appareil en milieu naturel ont ensuite mis en évidence une limitation de ce dernier. Les conditions d'écoulement sur les sites à nettoyer sont déterminantes pour que l'appareil puisse fonctionner efficacement. Suite au passage de l'appareil, le bac-récupérateur était parfois vide, indiquant que les conditions d'écoulement n'étaient définitivement pas assez importantes pour que l'appareil puisse déloger les sédiments fins logés dans le substrat.

En effectuant une série de tests plus exhaustifs en milieu naturel pour une grande gamme de conditions hydrauliques et granulométriques variées, caractéristiques de sites de fraie, il sera possible de déterminer précisément les limites d'applicabilité et d'efficacité de cette nouvelle technique de nettoyage.

Par ailleurs, cette innovation technique reste prometteuse, car elle ne possède pas les inconvénients de la majorité des autres méthodes. Même si la section précédente de ce chapitre a démontré que l'infiltration de sédiments fins se produisait durant la période d'incubation, il est tout de même intéressant de posséder un appareil efficace qui puisse diminuer de façon non négligeable la quantité de sédiments fins présents dans le substrat d'une frayère avant la période de fraie. En démobilisant et nettoyant le substrat

immédiatement avant la fraie, cela permet aux femelles d'utiliser un substrat relativement facile à creuser et plus propre au départ que si le site n'avait pas été nettoyé. Il est donc envisageable d'utiliser cette nouvelle technique pour améliorer la qualité du substrat de fraie sur certaines rivières à saumon qui sont présentement caractérisées par de nombreuses frayères saturées en sédiments fins.

Cette nouvelle technique constitue donc une avancée importante dans le domaine de l'environnement et elle est profitable à plusieurs niveaux, autant biologique, qu'économique et social. En utilisant cette technique, il devient possible d'occasionner un rehaussement de la qualité de l'habitat physique de l'espèce et ainsi de favoriser sa reproduction et donc, à long terme, d'augmenter les populations. Par le fait même, pour certaines régions du Québec, ceci permettrait d'améliorer les conditions de la pêche sportive, ce qui représenterait un gain socio-économique important.

Le contenu de ce chapitre a été présenté sous forme de rapports techniques au Fonds des Priorités Gouvernementales en Sciences et en Technologies et a aussi été présenté sous forme de présentation orale lors d'un congrès.

**Bérubé, F., Levasseur, M., Bergeron, N. et Pouliot, M.-A. (2004).** Développement et démonstration de techniques pour la restauration de la qualité du substrat de fraie des salmonidés. Rapport synthèse. Volet environnement du Fonds des Priorités Gouvernementales en Sciences et Technologies. 16 pages.

**Bérubé, F., Levasseur, M., Bergeron, N. et Pouliot, M.-A. (2003).** Développement et démonstration de techniques pour la restauration de la qualité du substrat de fraie des salmonidés. Rapport final. Volet environnement du Fonds des Priorités Gouvernementales en Sciences et Technologies. 84 pages.

**Bérubé, F., Levasseur, M., Pouliot, M.-A et Bergeron, N.** (2003). Développement et démonstration de techniques pour la restauration de la qualité du substrat de fraie des salmonidés. Rapport d'étape no.2. Volet environnement du Fonds des Priorités Gouvernementales en Sciences et Technologies. 21 pages.

**Bergeron, N., Levasseur, M. et Bérubé, F.** (2002). Développement et démonstration de techniques pour la restauration de la qualité du substrat de fraie des salmonidés. Rapport d'étape no.1. Volet environnement du Fonds des Priorités Gouvernementales en Sciences et Technologies. 40 pages.

**Bérubé, F., Levasseur, M. et Bergeron, N.** (2002). Démonstration d'une nouvelle technique de nettoyage du substrat de frayères. Présentation orale dans le cadre de la rencontre annuelle du CIRSA, Université Laval, Québec.

#### **4.5 Contribution du chapitre 8**

Le chapitre 8 est un chapitre complémentaire aux chapitres 5, 6 et 7 en ce qu'il porte sur l'analyse de variables autres que la teneur en sédiments fins dans le substrat, en lien avec la qualité d'un environnement intragravier propice à la survie des embryons de saumon.

L'évaluation de la qualité d'une frayère se fait habituellement par une analyse granulométrique du substrat. Par ailleurs, il serait plus précis de déterminer la qualité d'une frayère par l'évaluation de la vitesse de l'écoulement intergranulaire puisque, comparativement à l'état du substrat, cette variable est directement reliée à la survie des embryons car elle contrôle les apports en oxygène nécessaires au développement de ces derniers lors de la période d'incubation. Selon la loi de Darcy, la vitesse de l'écoulement intergranulaire est influencée en partie par l'état du substrat, mais aussi par le gradient hydraulique. D'ailleurs, les résultats d'une étude récente (Lapointe *et al.*, 2004) ont entre autres démontré l'impact de cette variable sur la vitesse de l'écoulement intergranulaire,

mais ont aussi révélé l'importance de l'interrelation entre cette variable et la teneur en sédiments fins dans le substrat en lien avec la vitesse de l'écoulement intergranulaire.

Tout comme l'étude de Lapointe *et al.* (2004), la majorité des études menées dans le but de mieux comprendre les interactions entre la vitesse de l'écoulement intergranulaire, le gradient hydraulique et les caractéristiques du substrat ont été réalisées en laboratoire. Puisque très peu d'études ont été menées en milieu naturel, concernant cette problématique, l'objectif de ce chapitre était de remédier à cette lacune. Par ailleurs, préalablement aux expérimentations sur le terrain, il était d'abord nécessaire d'effectuer une expérience en milieu contrôlé afin de développer une méthode fiable qui allait permettre d'estimer adéquatement la vitesse intergranulaire. Suite au développement de cette méthode, il était ainsi possible d'effectuer des expérimentations en milieu naturel afin de répondre à l'objectif spécifique de ce chapitre, qui consiste à déterminer l'importance relative du gradient hydraulique et des caractéristiques du substrat sur la vitesse de l'écoulement intergranulaire.

### ***Développement d'une méthode pour déterminer la vitesse de l'écoulement intergranulaire***

Plusieurs méthodes existent afin d'estimer la vitesse de l'écoulement intergranulaire. Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé la méthode du traçage, qui consiste à déterminer la vitesse en calculant le temps écoulé lors du déplacement d'un traceur dans le substrat sur une distance déterminée. La valeur de la vitesse est ensuite estimée à partir des courbes résultantes de la variation de la concentration du traceur dans le temps. Le mode de la distribution est le paramètre standard le plus fréquemment utilisé. Toutefois, les résultats issus de nos expérimentations menées en milieu contrôlé ont permis de déterminer que l'utilisation de ce seul paramètre n'est pas tout à fait adéquat. En effet, l'utilisation de deux paramètres, soit un premier associé au mode de la distribution et un second relié à la moyenne, semble nécessaire afin d'obtenir une valeur adéquate de la vitesse intergranulaire. Nous avons ainsi développé un modèle mathématique qui permet

de déterminer la vitesse en tenant compte de ces deux paramètres. Cette contribution est essentielle, puisque l'utilisation de valeurs erronées de la vitesse intergranulaire, servant souvent de données de base dans les études portant sur les interactions entre différentes variables concernant la qualité de l'environnement intragravier, peut biaiser les résultats et mener à des conclusions erronées.

Par ailleurs, une interrogation demeure: peut-on estimer adéquatement la vitesse intergranulaire dans différents milieux à partir du modèle mathématique qui a été développé dans un substrat de composition granulométrique spécifique? De ce fait, il est recommandé de répéter notre expérience dans des substrats de mixtures différentes afin de déterminer si une modification de cette variable peut affecter de façon notable les résultats et ainsi mettre en doute l'équation et donc l'applicabilité du modèle mathématique. Une standardisation du modèle mathématique pour une gamme variée de substrat que l'on peut retrouver en milieu naturel est donc essentielle.

#### ***Évaluation de l'importance relative du gradient hydraulique et des caractéristiques du substrat sur la vitesse de l'écoulement intergranulaire en milieu naturel***

L'objectif de cette section qui consistait à déterminer l'importance relative de différentes variables sur l'écoulement intergranulaire, plus spécifiquement le rôle probable du gradient hydraulique, n'a été que partiellement atteint. En effet, les résultats n'ont indiqué aucune relation significative entre les différentes variables. Par ailleurs, les conditions dans lesquelles l'échantillonnage a été mené ainsi que quelques limitations reliées à l'échantillonnage peuvent avoir affecté les résultats obtenus. Ces lacunes ainsi que les recommandations proposées pour y remédier sont présentées de façon détaillée à la section 8.3.4 du chapitre 8.

Les contributions de cette section de chapitre sont tout de même appréciables. D'une part, à notre connaissance, il s'agit d'une première étude qui a été menée en milieu naturel concernant l'importance relative de différentes variables, entre autre le gradient

hydraulique, sur l'écoulement intergranulaire. Ces expérimentations auront permis d'identifier certains problèmes et lacunes qui pourront être pris en compte ou simplement évités lors de futures études.

Somme toute, malgré l'aspect préliminaire de l'ensemble de ces résultats et des nombreuses recommandations proposées, les contributions de ce chapitre sont importantes. Ces résultats constituent de nouvelles pistes de recherche qui mèneront probablement à déterminer l'importance de nouvelles variables dans l'optique d'analyser avec plus de précision la qualité d'un site de fraie. Ce nouvel apport est considérable autant pour les chercheurs que les gestionnaires de rivières qui se penchent sur les questions concernant la problématique de la qualité des sites de reproduction des salmonidés. En effet, une meilleure connaissance de l'environnement intragravier et des différentes variables qui le modifient est une contribution non négligeable à l'avancement de la science et plusieurs applications peuvent en découler. Par exemple, advenant la démonstration de l'importance du gradient hydraulique, l'analyse de la qualité d'un site de fraie qui se fait habituellement par l'échantillonnage du substrat, pourrait être améliorée par l'ajout de la caractérisation du gradient hydraulique.

Il est à mentionner que le contenu de ce chapitre n'a pas été présenté sous forme d'article scientifique, de rapport ou de présentation orale, étant donné l'aspect préliminaire des résultats obtenus et des lacunes méthodologiques qui laissent entrevoir la nécessité de nouvelles expérimentations.



**CHAPITRE 5****A field method for the concurrent measurement of fine sediment content and embryo survival in artificial salmonid redds**

---

Levasseur, Mylène, Bérubé, Francis and Bergeron, Normand E.

INRS- Eau, Terre et Environnement

490 de la Couronne, Québec, Qc, G1K 9A9, Canada

Phone : (418) 654-2524

Fax : (418) 654-2600



## Résumé

Il est reconnu depuis longtemps que la présence excessive de sédiments fins dans le substrat de fraie est néfaste pour la reproduction des salmonidés. Afin de déterminer l'impact des sédiments fins sur la survie des embryons, plusieurs chercheurs ont utilisé une combinaison de différentes techniques d'échantillonnage. Certaines techniques avaient été développées plus spécifiquement pour estimer le succès de survie des embryons, tandis que d'autres avaient plutôt été développées pour mesurer les caractéristiques du substrat. Par contre, aucune de ces techniques ne permettait l'échantillonnage en simultané de la survie des embryons et de l'infiltration des sédiments fins durant la période d'incubation. Pour remédier à ce problème, nous avons développé une nouvelle technique d'échantillonnage, soit le cube d'infiltration, qui permet d'échantillonner l'infiltration des sédiments fins ainsi que la survie des embryons dans un environnement qui reproduit un nid naturel de saumon atlantique et ce, à différents moments durant la période d'incubation. Dans le but de tester l'efficacité de cette nouvelle technique, une expérimentation a été effectuée sur la Rivière Ste-Marguerite (Saguenay, Québec). Les résultats ont révélé que la technique était efficace pour mesurer simultanément les deux variables et ce, dans une unité morpho-sédimentologique qui reproduit les caractéristiques d'un nid naturel de saumon atlantique. Les résultats ont démontrés que le pourcentage de sédiments fins  $< 1$  mm était plus faible dans les cubes comparativement au substrat adjacent, ce qui avait été illustré par les résultats d'études antérieures. L'analyse portant sur la survie a permis de conclure que la technique était efficace, car 60.1 % des œufs qui avaient été enfouis dans les cubes d'infiltration au tout début de la période d'incubation ont été retrouvés à la fin de cette dernière.

## **Abstract**

It is well recognized that fine sediment affects salmon embryo survival. In order to link egg survival to spawning substrate characteristics, researchers have used a combination of techniques. Many sampling techniques have been developed to estimate the success of embryo survival and others have been developed to measure fine sediment infiltration in spawning substrate. None of these techniques is adapted to simultaneously characterize embryo survival and fine sediment infiltration during the incubating period. To overcome this problem, we developed a new method: the infiltration cube which permits infiltration and spawning survival measurements throughout the incubation period in an environment that simulates a natural Atlantic salmon redd. A field survey was conducted on the Ste-Marguerite River (Saguenay, Quebec) to test the efficiency of this new method. Results show that the infiltration cubes effectively mimic a natural salmon redd. A decrease in fine sediment (< 1 mm) content between the undisturbed gravel and the artificial redd is similar to previously published results comparing the substrate of natural redds and adjacent undisturbed gravels. Embryo survival analysis demonstrated that the technique is efficient. At the end of the incubation period we recovered 60.1 % of the eggs placed in the infiltration cubes following the spawning period.

## Introduction

It is widely acknowledged that excessive amounts of fine sediment within salmonid spawning gravel is detrimental to the survival of embryos through a decrease in the intragravel flow necessary for the oxygenation of the embryos. This excess of fine sediment can also reduce fry emergence success due to entombment (Chapman, 1988; Reiser, 1999; Armstrong *et al.*, 2003). The digging and egg burying process performed by the spawning female causes the removal of a significant amount of fines almost regardless of the original fine sediment content of the spawning gravel (Reiser and White, 1988; Lisle and Lewis, 1992), thereby ensuring an appropriate inflow of oxygenated water to the embryos at the beginning of the incubation period (Everest *et al.*, 1987; Kondolf *et al.*, 1993; Montgomery *et al.*, 1996). Therefore, the detrimental effect of fine sediments on embryo survival is more dependent to their infiltration in the substrate following redd construction until fry emergence rather than fine sediment concentration prior to or immediately following redd construction (Lisle, 1989; Lisle and Lewis, 1992; Acornley and Sear, 1999). For this reason, the assessment of spawning gravel suitability should not be based on undisturbed potential spawning gravel samples but on within-redd measurements of fine sediment content and associated embryo survival during the incubation period.

Although several methods have been used to monitor embryo survival (Hobbs, 1937; Shearer, 1961; Harris, 1973; Lacroix, 1985; Gustafson-Marjanen and Moring, 1984; Scrivener, 1988; Mackenzie and Moring, 1988; Rubin, 1995; Donaghy and Verspoor, 1997) and fine sediment infiltration (Lisle, 1989; Wesche *et al.*, 1989; Lisle and Eads, 1991; Fletcher *et al.*, 1995; Clarke and Scruton, 1997; Acornley and Sear, 1999; Bond, 2002), none of them allowed concurrent field measurements of embryo survival and fine sediment in an environment reproducing a natural salmonid redd. A natural salmon redd has a surface morphology and grain size composition distinct from the undisturbed adjacent gravel (Kondolf *et al.*, 1993). Morphologically, it is characterized by an upstream pit and a downstream tailspill inducing a characteristic flow pattern within the redd (Rennie and Millar, 2000). In terms of grain size, the redd is

composed of coarser lag gravels with larger pore sizes than outside the redd (Lisle and Eads, 1991; Kondolf *et al.*, 1993). Based on these differences, the flow and fine sediment infiltration processes occurring inside and outside the redd area should be different. This demonstrates the need to develop a method capable of measuring fine sediment content and embryo survival inside a redd morpho-sedimentological unit. Moreover, since the amount and timing of fine sediment infiltration within the redds depend on flow characteristics and sediment transport events occurring throughout the incubation period, the method should allow measurements at different moments between redd construction and fry emergence (Lisle and Eads, 1991). The method could not utilize containers with vertical walls, neither solid nor porous, since they interfere with the intragravel flow and the infiltration of fines within the redds. Additionally, these walls can modify the scour and fill processes that can change redd gravel composition and thereby induce embryo mortality. Finally, the method should preclude any sampling bias due to a loss of fine particles during substrate sample removal from the channel bed.

In this paper, we present a new field method which allows concurrent measurements of fine sediment content and embryo survival in an incubating environment that replicates as closely as possible, the morphology and grain size composition of a natural salmon redd, as well as the flow and sediment transport conditions experienced by embryos in natural redds during the incubation period. We then present the results of a field survey conducted on the Ste-Marguerite River (Saguenay, Quebec) to test the efficiency of this new method.

### **Description of the method**

The general principle of the method is to bury an infiltration cube containing a known amount of fertilised eggs within a morpho-sedimentological unit resembling a salmon redd. The cube is installed in the spawning gravel immediately following the reproduction period of the studied salmon species. The infiltration cube can then be removed from the

substrate at anytime during the incubation period to determine survival up to that moment. However, the cubes should be retrieved no later than approximately one week prior to the expected fry emergence date to avoid escapement.

The infiltration cube method is a modification of the infiltration bag sampling method developed by George Sterling (1980) but described in detail for the first time by Lisle and Eads (1991). The infiltration cube is a rectangular (30 x 30 x 20 cm) metal frame with no walls and a latticework bottom to which a collapsed bag is attached (figure 5.1). Each cube is installed using a procedure that aims to reproduce the construction and morpho-sedimentological structure of a natural salmon redd. First, a depression about 30 cm deep and 75 cm wide is dug in the substrate by manually excavating the particles and pushing them downstream. The folded bag and infiltration cube are then installed in the depression and covered with a 10 cm deep layer of gravel by lifting upstream particles over the cube in a manner, similar to a spawning female salmon that sweeps fine sediment downstream in the flow. A few large rocks are then positioned at the centre of the cube to create large interstices where a known number of fertilised salmon eggs are carefully placed with a pipette to avoid loss or injury. The construction of the redd is then completed by covering the infiltration cube and eggs with upstream gravel in the manner described above. Upon completion, the infiltration cube is embedded in a morpho-sedimentological unit, similar to a natural salmon redd, characterized by an upstream pit and a downstream tailspill (figure 5.2) and composed of coarser lag gravels with larger pore sizes than outside the redd.

Four wires are affixed to the corners of the bag and project above the bed surface after installation for later removal. The infiltration cubes are removed from the substrate by attaching the wires to a winch on a tripod installed on either the riverbed, a floating platform, or on the ice surface (figure 5.3). When pulling the bag upward, the rectangular metal frame guides the opening of the bag in the upright direction, thereby ensuring the proper collection of the unbound rectangular volume of substrate lying immediately above the bag. Indeed, preliminary trials of the infiltration bag method did not include the

metal frame. We noticed that during extraction, larger bed material particles often caused the opening of the bag to deviate from the upright direction, thereby sampling the substrate diagonally towards the surface. For our purposes, this situation was unacceptable since we needed to ensure that the substrate volume sampled included all the incubating embryos positioned at the center of the cube. This problem was remedied with the conception of the wall-less rectangular metal frame.

Once retrieved from the substrate, the bag containing the substrate sample, the embryos and the metal cube was put in a large container where the gravel was carefully inspected to count all the embryos, to determine whether they were dead or alive, and to identify their developmental stage. The coarser portion of the substrate sample ( $> 16$  mm) is then weighed and wet sieved in the field at phi intervals, and a subsample of the substrate  $< 16$  mm is taken for dry sieve analysis in the laboratory.

### **Comparison between artificial and natural salmonid redds**

Morphologically, the artificial redds obtained by the method outlined above are characterized by an upstream pit and a downstream tailspill very similar to natural salmonid redds. In terms of grain size, we tested the ability of our redd construction method to reproduce the winnowing effect of a salmonid female constructing its redd by measuring the fine sediment content of substrate samples taken inside and outside artificial redds immediately after construction. Nine paired substrate samples were collected, using the freeze-core technique (Lisle and Eads, 1991; Petts *et al.*, 1989), inside and outside artificial redds constructed on an Atlantic salmon (*Salmo salar*) spawning site of the Sainte-Marguerite River (Saguenay, Québec). Figure 5.4 shows the relationship between the percentage of sediment  $< 1$  mm measured in the artificial redds and adjacent gravels. The results indicate that the redd construction procedure had the general effect of reducing the fine sediment content (on average by 2.3 %) compared to the surrounding gravel. This reduction in fine sediment occurred in 77.8 percent of cases. This result is similar to previously published comparisons of fine sediment content  $< 1$  mm in natural

salmonid redds and adjacent undisturbed gravels (Everest *et al.*, 1987; Kondolf *et al.*, 1993). This suggests that the redd construction procedure used in this study adequately replicated a natural salmonid redd.

### **Field survey to test the efficiency of the new method**

A field survey was conducted on the Ste-Marguerite River (Saguenay, Quebec) to test the efficiency of the infiltration cube method to concurrently measure fine sediment content and embryo survival of Atlantic salmon.

#### **Study sites**

Three spawning sites used by Atlantic salmon were monitored. These sites were chosen within the boundaries of known spawning habitat but accounted for dissimilarities in riffle sedimentology and hydraulics. In terms of substrate characteristics, site A was well sorted and had a coarse-grained substrate (mean  $D_{50} = 31.6$  mm). Site B, however, was poorly sorted and characterized by a smaller grain size (mean  $D_{50} = 24.9$  mm) while site C was moderately sorted and characterized by the smallest grain size of the studied sites (mean  $D_{50} = 22.8$  mm). The mean fine sediment content, as defined by the Wentworth scale ( $< 2$  mm), of site B was lower (mean  $< 2$  mm = 12.5 %) than site C (mean  $< 2$  mm = 13.1 %) and site A (mean  $< 2$  mm = 14.1 %) sites. The morphology and hydraulics of the sites A and B were that of a classic riffle set between two oppositely curved meander bends with deep pools. Compared to the two other sites, site C was relatively straighter and shallower.

#### **Method**

In late October 2000, immediately following the natural salmon spawning period, five infiltration cubes were buried in the substrate of each site (3 sites x 5 cubes = 15 samples) using the procedure described in the first part of the paper. Each cube contained

100 fertilized eggs. These eggs and milt were obtained from the hatchery of Tadoussac and are from the same genetic stock as the Atlantic salmon of the Ste-Marguerite River. The eggs were fertilised and water-hardened at the hatchery (located approximately 25 km from the river) and then transported to the study sites in cooled water-filled jars. The eggs were kept at the same temperature as the stream water to avoid thermal shock during the construction of the artificial redds and the installation of the infiltration cubes. Within an infiltration cube, the eggs were positioned approximately 20-25 cm below the surface, which is the range of typical burial depths of Atlantic salmon eggs (DeVries, 1997). Eggs were buried in the substrate within 24-hours of fertilization.

In May 2001, one week prior to the estimated date of fry emergence<sup>3</sup>, the infiltration cubes were extracted from the substrate and analyzed to determine the fine sediment content and embryo survival in each cube.

## **Results and discussion**

### ***Infiltration cube retrieval and sediment sample characteristics***

All 15 infiltration cubes installed in late October were recovered the following spring. Inspection of the bed surface prior to cube retrieval indicated that they generally did not protrude above the bed surface nor were they buried beneath excessive amounts of sediment. The upstream pit and downstream tailspill associated with each cube had disappeared, showing evidences of active bed load transport during the incubation period. The grain analysis have shown that the volume of the samples collected (approximately 65 kg) were representative of a complete grain-size distribution.

---

3 The emergence period was estimated from hourly-recorded substrate water temperature data used to extrapolate the degree-day hatching threshold for Atlantic salmon published by MAPAQ (1996).

### ***Embryo recovery success and hatching survival***

Upon retrieval of the infiltration cubes in the spring, an average of 60.1 % (table 5.1) of the eggs originally placed in the artificial redds in October were recovered. There are three possible explanations for the disappearance of 39.9 % of the eggs. First, they may have been scoured from the artificial redds by bed load transport events that mobilized the substrate down to the redd zone where the eggs were buried. Second, the eggs may have died at the beginning of the incubation period and then decomposed as reported in other studies (Hausle and Coble, 1976; MacKenzie and Moring, 1988). Third, the fry may have emerged prior to infiltration cube extraction. However, the recovery success is considered satisfactory because the infiltration cubes do not have vertical walls and the field survey was conducted in a wide river.

Hatching success of individual redds ranged from 8.3 % to 100 %, with an average of 68.3 % (table 5.1). Average hatching success at each spawning site was 66.8 %, 57 % and 81.1 % at sites A, B and C respectively. Hatching survival was determined by calculating the ratio of live embryos to the total number recovered from the infiltration cube, as opposed to the number initially buried. While we acknowledge the possibility of overestimating survival as noted by Pauwels and Haines (1994), we prefer this method because the cause of egg disappearance is unknown. Our hatching survival results are similar to those documented in the literature. Atlantic salmon hatching survival values were obtained by Lacroix (1985) with an average hatching success of 78 % in acidified Nova Scotia streams, and by MacKenzie and Moring (1988) who reported an average hatching survival of 74 % in a Maine stream. Harriman and Morrison (1982) and Pauwels and Haines (1994) obtained somewhat lower hatching success values of 42 % (Scottish river) and 30.7 % (Maine river) respectively.

In this paper, the use of the new infiltration cube method permitted the concurrent measurement of fine sediment content and embryo survival in artificial redds that reproduced the form and grain size characteristics of a natural Atlantic salmon redd. As

the infiltration cube had no walls, it did not interfere with the natural intragravel flow pattern and the fine sediment infiltration processes. Moreover, the bags attached to the cubes prevented the loss of fine sediments. This new method is also innovative because it allows measurements at different moments between redd construction and fry emergence. We conclude that the infiltration cube method is currently one of the best available methods to assess the survival of salmon embryos in natural stream conditions.

## **Acknowledgements**

We would like to thank our partners: Fonds des Priorités Gouvernementales en Science et en Technologie (FPGST-E), Centre Interuniversitaire de Recherche sur le Saumon Atlantique (CIRSA), Association rivière Ste-Marguerite, Faune et Parcs Québec (FAPAQ), and Pisciculture de Tadoussac. The research was partially funded by a discovery grant from the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) to Normand Bergeron. Special thanks to André Boivin, Marc-André Pouliot, Josérito Savard and Véronique Thériault for their assistance in the field and to Julie Smith for reviewing the grammatical content of the manuscript. The Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) provided a postgraduate scholarship to Mylène Levasseur.

## References

- Acornley, R.M. and Sear, D.A. (1999). Sediment transport and siltation of brown trout (*Salmon trutta L.*) spawning gravels in chalk streams. *Hydrological Processes* (13): 447-458.
- Armstrong, J.D., Kemp, P.S., Kennedy, M.L. and Milner, N.J. (2003). Habitat requirements of Atlantic salmon and brown trout in rivers and streams. *Fisheries Research* (62): 143-170.
- Bond, N.R. (2002). A simple device for estimating rates of fine sediment transport along the bed of shallow streams. *Hydrobiologia* (468): 155-161.
- 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): 1-21.
- Clarke, K.D. and Scruton, D.A. (1997). Use of the Wesche method to evaluate fine-sediment dynamics in small boreal forest headwater streams. *North American Journal of Fisheries Management* (17): 188-193.
- DeVries, P. (1997). Riverine salmonid egg burial depths: review of published data and implications for scour studies. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (54): 1685-1698.
- Donaghy, M.J. and Verspoor, E. (1997). Egg survival and timing of hatch in two Scottish Atlantic salmon stocks. *Journal of Fish Biology* (51): 211-214.
- Everest, F.L., Beschta, R.L., Scrivener, J.C., Koski, K.V., Sedell, J.R., and Cederholm, C.J. (1987). Fine sediment and salmonid production :a paradox. Pages 98-142 in E.O. Salo and T.W. Cundy, editors. *Streamside management : forestry and fishery interactions*. University of Washington, College of forest resources, Cont. No. 57. Seattle.
- Fletcher, W.K., McLean, W.E., and Sweeten, T. (1995). An instrument to monitor infiltration of fine sediment into stable gravel stream beds. *Aquacultural Engineering* (14), no. 4: 289-296.
- Gustafson-Marjanen, K.I. and Moring, J.R. (1984). Construction of artificial redds for evaluating survival of Atlantic salmon eggs and alevins. *North American Journal of Fisheries Management* (4): 455-461.

- Harriman, R. and Morrison, B.R. (1982). Ecology of streams draining forested and non-forested catchment in an area of central Scotland subject to acid precipitation. *Hydrobiologia* (88): 251-263.
- Harris, G.S. (1973). A simple egg box planting technique for estimating the survival of eggs deposited in stream gravel. *Journal of Fish Biology*. (5): 85-88.
- Hausle, D.A. and Coble, D.W. (1976). Influence of sand in redds on survival and emergence of brook trout (*Salvelinus fontinalis*). *Transactions of the American Fisheries Society*.(1): 57-63.
- 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. (cited in Mackenzie and Moring, 1988).
- Kondolf, G.M., Sale, M.J. and Wolman, M.G. (1993). Modification of fluvial gravel size by spawning salmonids. *Water Resources Research* (29), no.7: 2265-2274.
- Lacroix, G.L. (1985). Survival of eggs and alevins of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in relation to the chemistry of interstitial water in redds in some acidic streams of Atlantic Canada. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*.(42): 292-299.
- Lisle, T.E. (1989). Sediment transport and resulting deposition in spawning gravels, north coastal California. *Water Resources Research* (25): 1303-1319.
- Lisle, T.E. and Eads, R.E. (1991). Methods to measure sedimentation of spawning gravels. US For. Serv.Res. Note, PSW-411. 8 pages.
- Lisle, T.E. and Lewis, J. (1992). Effects of sediment transport on survival of salmonid embryos in a natural stream: a simulation approach. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. (49): 2337-2344.
- MacKenzie, C. and Moring, J. R. (1988). Estimating survival of Atlantic salmon during the intragravel period. *North American Journal of Fisheries Management* (8): 45-49.
- MAPAQ (1996). Guide d'élevage des salmonidés. Fascicule 3: Reproduction, incubation and alevinage, Chapitre 3.5: L'incubation, pp. 38-44.

- Montgomery, D. R., Buffington, J.M., Peterson, N.P., Schuett-Hames, D., and Quinn, T.P. (1996). Stream-bed scour, egg burial depths and the influences of salmonid spawning on bed surface mobility and embryo survival. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. (53): 1061-1070.
- Pauwels, S.J. and Haines, T.A. (1994). Survival, hatching, and emergence success of Atlantic salmon eggs planted in three Maine streams. *North American Journal of Fisheries Management* (14): 125-130.
- Petts, G.E., Thoms, M.C., Brittan, K and Atkin, B. (1989). A freeze-coring technique applied to pollution by fine sediment in gravel-bed rivers. *The Science of the Total Environment* (84): 259-272.
- Rennie, C.D. and Millar, R.G. (2000). Spatial variability of stream bed scour and fill: a comparison of scour depth in chum salmon (*Oncorhynchus keta*) redds and adjacent bed. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (57): 928-938.
- Reiser, D.W. and White, R.G. (1988). Effects of two sediment size classes on survival of steel head and chinook salmon eggs. *North American Journal of Fisheries Management*. (8): 432-437.
- Reiser, D.W. (1999). Sediment in gravel bed rivers: ecological and biological considerations. Klingeman, P.C., Beschta, R.L., Komar, P.D., and Bradley, J.B. (eds.) *Gravel-Bed Rivers in the Environment*. Water Resources Publications, Highland Ranch, Colorado. pp. 199-228.
- Rubin, J.-F. (1995). Estimating the success of natural spawning of salmonids in streams. *Journal of Fish Biology* (46): 603-622.
- Scrivener, J.C. (1988). Two devices to assess incubation survival and emergence of salmonid fry in an estuary streambed. *North American Journal of Fisheries Management* (8): 248-258.
- Shearer, W.M. (1961). Survival rate of young salmonids in streams stocked with "green" ova. *International Council for the exploration of the sea*, C.M. 98, Copenhagen. (cited in Mackenzie and Moring, 1988).
- Wesche, T.A., Reiser, D.W., Hasfurther, V.R., Hubert, W.A. and Skinner, Q.D. (1989). New technique for measuring fine sediment in streams. *North American Journal of Fisheries Management* (9): 234-238.

Table 5.1 Mean, standard deviation (sd) and coefficient of variation ( $CV=(sd/mean)*100$ ) of embryo survival for each spawning site.

Site		Survival analysis	
		Egg recovery	Hatching survival
A*	mean (%)	50.8	66.8
	sd	14.1	39.7
	CV (%)	27.8	59.4
B*	mean (%)	63.4	57.0
	sd	18.7	30.6
	CV (%)	29.5	53.7
C*	mean (%)	66.2	81.1
	sd	14.1	20.6
	CV (%)	21.3	25.4
Mean of A, B and C (%)		60.1	68.3
Mean sd		15.0	28.2

\* Each spawning site was equipped with 5 infiltration cubes and each cube contained 100 fertilized eggs.

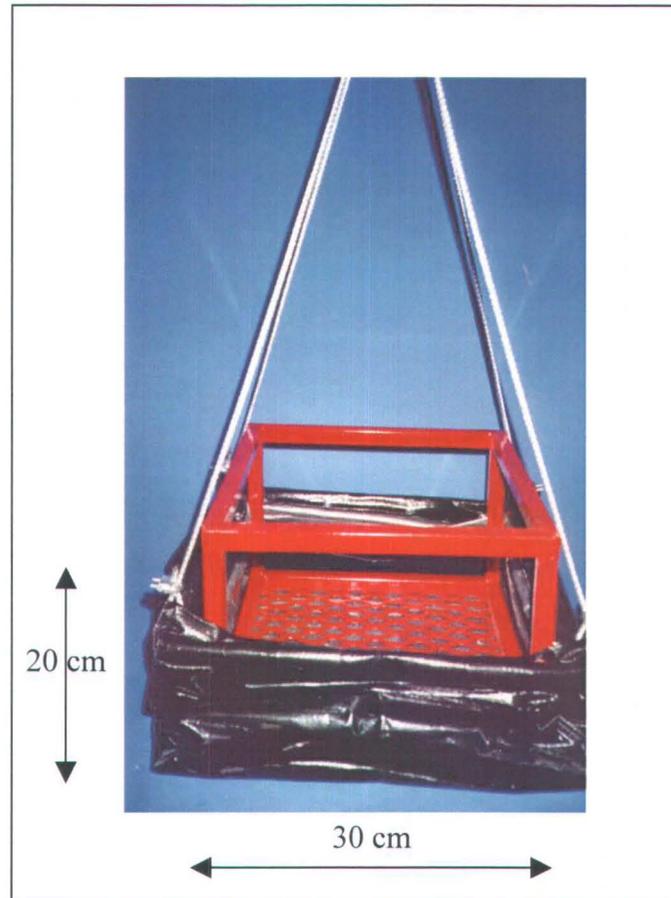


Figure 5.1 Infiltration cube.

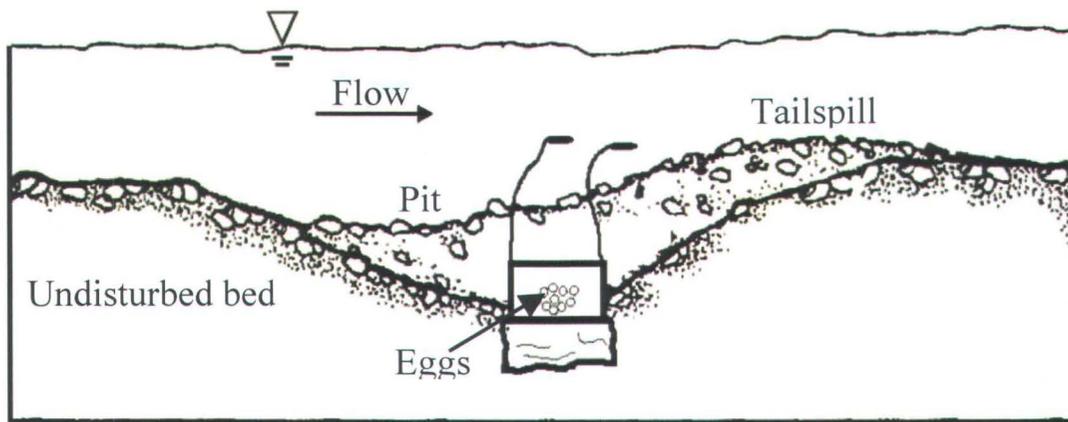


Figure 5.2 Infiltration cube with eggs embedded in a morpho-sedimentological unit similar to a natural salmon redd.



Figure 5.3 Infiltration cube extracted during the late winter period.

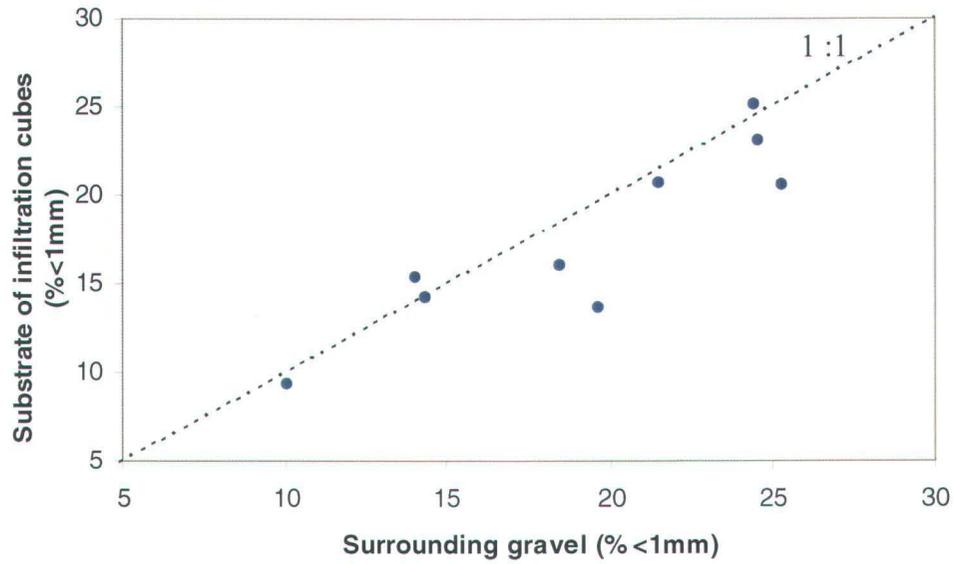


Figure 5.4 Difference in percentage of fine sediment (< 1 mm) between surrounding gravel and infiltration cube substrate samples on a spawning site of the Sainte-Marguerite River.

**CHAPITRE 6****Spatio-temporal patterns of silt and fine sand infiltration into spawning redds and their importance to salmon embryo survival in the Sainte-Marguerite River, Saguenay Region, Quebec**

---

Levasseur, Mylène, Bergeron, Normand E., Lapointe, Michel. F.\*, Bérubé, Francis.

INRS- Eau, Terre et Environnement

490 de la Couronne, Québec, Qc, G1K 9A9, Canada

Phone : (418) 654-2524

Fax : (418) 654-2600

\* McGill University, Department of geography

805 Sherbrooke Street West, Montreal, Quebec, H3A 2K6, Canada

Phone : (514) 398-4959

Fax : (514) 398-7437



## Résumé

Il est reconnu que l'infiltration excessive de sédiments fins dans le substrat de fraie de saumon atlantique est un facteur important qui limite les succès de reproduction. Par contre, suite à la construction du nid par la femelle, les œufs sont déposés dans un substrat relativement exempt de ce type de sédiments. Par conséquent, l'effet néfaste des sédiments fins sur la survie des embryons dépendrait de la quantité de ces derniers s'infiltrant dans le nid durant la période d'incubation. Il n'existe actuellement aucune étude ayant déterminé à quels moments se produisent les événements d'infiltration des sédiments fins dans les nids de saumon atlantique. Une nouvelle technique, soit le cube d'infiltration, qui permet d'échantillonner en simultanément l'infiltration des sédiments fins ainsi que la survie des embryons à différents moments durant la période d'incubation, a été utilisée. Cette technique permet d'échantillonner dans un environnement reproduisant les caractéristiques d'un nid naturel de saumon. Les résultats n'ont démontré aucune relation significative entre la survie à l'éclosion et les valeurs de Sand Index (SI) et de sédiments < 2 mm. Seule une relation significative entre le pourcentage de survie et le pourcentage de deux fractions de sédiments fins (silt et sable très fin) a été détectée. Ces deux fractions ont été combinées pour l'analyse spatio-temporelle de l'infiltration, puisque les analyses ont démontré qu'elles étaient inter-corrélées. Selon les résultats obtenus, l'infiltration des silt et sable très fin s'effectuait plus particulièrement pendant la période hivernale, mais lors de la crue de printemps, la dynamique de l'infiltration était plus complexe. Dans certaines zones des sites à l'étude, la crue permettait de purger considérablement le substrat d'une certaine quantité de sédiments très fins, tandis qu'ailleurs, elle favorisait l'infiltration. Ce sont les événements de transport en charge de fond intenses, qui se produisent lors de la crue de printemps, qui permettent de démobiler le substrat et ainsi d'en expulser les sédiments fins. La localisation spatiale des nids artificiels influence la dynamique temporelle de l'infiltration lors de la période d'incubation. Par exemple, les nids artificiels localisés près d'un banc d'accumulation étaient caractérisés par une augmentation de la quantité de sédiments très fins dans le substrat suite à la crue de printemps, tandis que les nids localisés tout près d'une berge en érosion étaient caractérisés par une diminution de la quantité de ces sédiments dans le substrat.

## Abstract

It is recognized that the infiltration of excessive quantities of fine sediment is an important factor for the reproductive success of Atlantic salmon. Since the female reduces fine sediment content during redd construction, the eggs are laid in a relatively fine sediment free environment. Consequently, the negative impact of fine sediment infiltration depends on their accumulation throughout the incubation period and not just initial conditions. Currently no studies demonstrate when fines infiltrate Atlantic salmon redds during the incubation period. A new technique, the infiltration cube, was used for simultaneous measurement of fine sediment content and embryo survival at different moments during the incubation period. This technique permits sampling in an environment that closely replicates a natural Atlantic salmon redd. The results showed no significant relationship between survival to hatching and the values obtained with the Sand Index and sediment < 2 mm. The only significant relationship was between the percent survival to hatching and the percent of very fine sediment (silt (< 0.063 mm) and very fine sand (0.063-0.125 mm)). The results demonstrated that these two fractions were inter-correlated and were therefore combined for the spatial and temporal infiltration analysis. The results illustrated that infiltration of these two fine sediment fractions mostly occurred during the low flow winter sampling periods. However, our results showed that the infiltration dynamic was more complex during the spring flood period. In certain study site zones, the fine sediments were flushed from the bed while in other zones infiltration predominated. This complexity is explained by spring flood bedload transport events that mobilized the pavement and permitted the flushing of fine sediment. The spatial distribution of the artificial redds on the study site influenced the temporal dynamic of very fine sediment infiltration during the incubation period. For example, the results demonstrated that redds located near the point bar on one site was characterized by an increase in very fine sediment content in the substrate during the spring sampling period. Conversely, redds positioned closer to the eroding bank were characterized by a decreased concentration of very fine sediment during the same period.

## Introduction

Many laboratory and field studies have demonstrated that the presence of excessive amounts of fine sediment in spawning gravels of salmonids is detrimental to the survival of incubating embryos (Turnpenny and Williams, 1980). The severity of this impact depends however on the precise size distribution of the fine sediment (Acornley and Sear, 1999). Coarse sands may form a sand seal at the surface of the redd and thus limit the ingress of even finer fractions as well as impede the emergence of fry (Crisp, 1993). On the other hand, fine sand and silt, which tend to fill redds from the bottom up (Beschta and Jackson, 1979), can strongly decrease the oxygen supply delivered to incubating embryos by reducing substrate permeability (Turnpenny and Williams, 1980). It is well documented that, per unit mass of sediment, silts and finer sand fractions reduce substrate permeability much more than coarser sand fractions (Vukovic and Soro, 1987). Peterson and Metcalfe (1981) concluded that fine sands (which they defined as 0.063 to 0.5 mm particles) were twice as detrimental for embryo survival to emergence as coarse sands, per unit mass. They defined a metric of spawning habitat quality called the Sand Index ( $SI = (Cs / 16) + (Fs / 8)$  where  $Cs$  = coarse sand and  $Fs$  = fine sand). A value less than 1 corresponds to a high survival success (Peterson and Metcalfe, 1981).

More recently, Lapointe *et al.* (2004) have shown in laboratory embryo incubations that a unit weight of silt (<0.063 mm) is approximately three times as detrimental to reproductive success on average than a similar weight of sand (0.063-2 mm). But effectively how important are these very fine fractions in varying reproductive success in natural salmon rivers? Due to the difficulty of accurately measuring minute quantities of silt and fine sand within spawning substrate, little is known about the relative variability (and seasonal changes) of very fine sediment in redds in a natural gravel-cobble bed salmon river. Furthermore, no field studies have documented the relative importance of this very fine sediment variability to explain the mutable incubation success in natural salmon rivers.

It is also well recognized that a significant quantity of fine sediment is winnowed from the redd by the digging action of the female during spawning (Lisle and Lewis, 1992; Reiser and White, 1988; Kondolf *et al.*, 1993). Thus, the eggs are laid down in a relatively clean gravel, providing appropriate initial conditions for the incubating embryos (Everest *et al.*, 1987; Kondolf *et al.*, 1993; Montgomery *et al.*, 1996; Zimmerman and Lapointe, 2005). Embryo survival is then more dependent on fine sediment infiltration in the redd during the incubation period than on fine sediment levels in the surrounding gravels before or immediately after spawning (Lisle, 1989). In general, it is thought that sands are flushed from gravel-cobble substrate during high flow events when the sediment surface layer is in motion, while fines tend to infiltrate into substrate during low flow periods (Lisle and Hilton, 1999). However, along active gravel-cobble bed rivers, the finest fractions (< 0.125 mm) are not as generally available in pools as are medium and coarse sands (0.125-2 mm). Therefore their spatial and temporal availability for infiltration may differ from that of better-studied coarser sand and granule fractions. The precise timing of infiltration during the incubation period may also be important in determining reproductive success (Kondolf, 2000). Stuart (1953) found that the effect of silt on incubating salmonid eggs is greater at the egg stage than at the vesiculated alevin stage. Reiser and White (1988) also suggested that there could be higher mortality associated with sediment accumulation occurring in early embryonic development stages compared to the stages after the circulatory process becomes functional. Although, the impact of fine sediments on embryo survival has been widely studied, little is known about the timing of infiltration events for various fine fractions and their effect on overall reproductive success.

The pattern and process of fine sediment infiltration during the incubation period is particularly poorly documented for salmon rivers in north-eastern North America. In these northern environments, most of the salmon embryo incubation period (generally from late October to the mid-June emergence period) coincides with winter low flow conditions and the presence of an ice cover. Ice covered streams are characterized by a longer incubation period, given that the duration of this period is determined by water temperature (Harmor and Garside, 1976; Kamler, 1992) which controls the embryo

development rate (Heggberget, 1988 in Lisle and Lewis, 1992). Although occasional warm winter spells can lead to ice breakups, jamming and local scour, in most reaches the intact ice cover provides a reduction of flow velocity and a decrease in sediment transport capacity (Beltaos *et al.*, 1993; Prowse, 1994) and the possibility of fine sediment deposition ( $< 0.125$  mm).

The general aims of this study are first to document the temporal and spatial variations of fine sediment content (including silts) in artificial Atlantic salmon redds at two sites in a northern salmon river, and second to quantify the impact of these variations on embryo survival.

Specific objectives are:

1. To determine the relative importance of variations in medium and coarse sands (0.125-2 mm) compared to those of fine sediment fractions (very fine sand and silt) ( $< 0.125$  mm) in explaining overall salmon embryo survival within redd variability in a gravel-cobble bed river.
2. To determine the temporal and spatial variability of very fine sediment fractions in salmon redds on the Ste-Marguerite River throughout the incubation period. More specifically during the fall pre-ice cover period, the winter ice-cover period, and the spring snow melt high flow period.

## **Study sites**

The study was conducted on the Main Branch of the Sainte-Marguerite River (SMR), Saguenay, Québec. This gravel-cobble bed river, which supports Atlantic salmon and brook trout populations, drains a catchment of 1 500 km<sup>2</sup> dominated by coniferous forests. The bankfull width of the channel is approximately 45 m near the outlet and the bankfull discharge is approximately 110 m<sup>3</sup>/s. A stable ice cover is generally present from mid-November to the end of March. Peak discharge typically occurs between March and mid-May after ice break-up.

Two spawning reaches (figure 6.1) used by Atlantic salmon were monitored for two consecutive incubation periods (Oct 2000 - May 2001 and Nov 2001 - June 2002), each with multiple artificial redds. The artificial redds were distributed over an area approximately 30 x 40 m and 30 x 30 m on the Glass Pool and Bras des Murailles sites, respectively. In order to encompass variable sedimentary conditions within the known limits of spawning habitat along this system, the two sites were selected to reflect variations in riffle sedimentology and recent use by salmon spawners. For many years, the Glass Pool site has been the most used spawning riffle on the main branch of the SMR. In contrast, the once important Bras des Murailles spawning site has been degraded over the 70's and 80's by increased sand and granule contents in local substrate due to a large-scale meander rectification upstream (Talbot and Lapointe, 2002 a and b). However, a few redds have been observed at the Bras des Murailles site in recent years.

At 27 mm, the median bed surface particle size ( $D_{50}$ ) at the Bras des Murailles site is much finer than at Glass Pool (47 mm). Mean sub-pavement sand content of Glass Pool riffle substrate is under 15 % while it exceeds 25 % in certain zones within the Bras des Murailles site. Silt ( $< 0.063$  mm) content in spawning substrate is relatively low ( $< 0.25$  %) on the Ste-Marguerite compared to conditions on the Cascapedia River located in the Gaspé Appalachian region (up to 1.5 %) (Zimmerman and Lapointe, 2005) reflecting differences in watershed lithology (granite and gneiss along the SMR versus friable mudstones along the Cascapedia River). The morphology and hydraulics of the Glass Pool site is that of a classic riffle bar set between two oppositely curved, river bends with deep pools. In contrast, the Bras des Murailles site is relatively straighter and a large, abandoned oxbow lake reconnects with the SMR a few metres upstream of the spawning sites (figure 6.1B). This geomorphic feature was observed to produce locally complex flow patterns during flood recession, with recirculation and fine sedimentation zones along one side of the bed near the mouth of the oxbow.

## Methods

### Infiltration-incubation sampling cubes design

One particular challenge of this study was the design of an artificial redd sampling unit that allowed embryo incubation and unhindered fines infiltration or flushing as well as permitting easy extraction from underwater and under an ice cover with no fines losses. Infiltration cubes were developed by our group to allow precise measurements of fine sediment content and embryo survival in an incubating environment. The cube environment reproduces as closely as possible, the morphology and grain size composition of a natural salmon redd as well as the flow and sediment transport conditions experienced by the embryos in natural redds during the incubation period (Levasseur *et al.*, 2006). An infiltration cube is a rectangular (30 x 30 x 20 cm) metal frame with no walls. A folded plastic bag impermeable to water is attached to its base (figure 6.2A). Four wires are affixed to the corners of the bag and project above the bed surface after installation for later removal. These wires are used to raise the sides of the bag and winch it up along with the substrate contained by the cube using a tripod installed on the river bed or ice surface. The size of each substrate sample collected from a cube is approximately 65 kg. The infiltration cube therefore provides a quick, easy and rugged method to pull samples out of the substrate even during tough winter field conditions (figure 6.2B). Additionally, they preclude any bias in infiltration rates due to lateral transport within substrate (absence of walls on the cube) or loss of fine particles during retrieval from underwater (presence of plastic bag).

Each infiltration cube was buried in the substrate using a procedure aimed at reproducing a natural salmon redd. First, a depression about 30 cm deep and 75 cm wide was dug in the substrate by manually excavating the particles underwater and pushing them the downstream current. The infiltration cube installed in this depression is then buried by mobilizing particles from the bed just upstream in a manner similar to a spawning female salmon. This enables fine sediments to be swept downstream by the flow thereby constructing a relatively fines-free redd. Following installation, each infiltration cube was

thus embedded in a morpho-sedimentological unit similar to a natural salmon redd with an upstream pit and a downstream tailspill. In terms of grain size, it was composed of coarser lag gravels with fewer fines and larger pore sizes than those found outside the redd.

### **Spatial and temporal sampling design**

Current techniques do not permit the determination of redd fine sediment content without destroying it for grain size analysis. It is therefore impossible to directly determine the temporal variation of fine sediment content within a single, fixed, redd substrate volume. We devised an approach to capture local temporal variations in fine sediment by monitoring their quantity in a replicate set of sampling cubes buried within a relatively small (about 4 m diameter), homogenous patch of spawning habitat. Within each patch, a group of 5-6 infiltration cubes were buried in the substrate immediately following the spawning period of Atlantic salmon (late October in SMR). Cubes within each patch were then extracted sequentially for grain size analysis at five moments during the incubation period. The first extraction was in October, immediately following installation to quantify initial conditions. The second removal was in December during low flow winter conditions prior to ice-formation. The third cube was extracted in January, following the formation of a solid ice-cover. The fourth cube was removed in late March, prior to ice break-up. Finally, in late May or June after the spring flood, the last cube was removed.

In both study sites, 5-6 homogeneous patches were identified over various parts of the spawnable riffle zone (figure 6.3A and B), and 5-6 incubation cubes were installed in each patch (figure 6.4). Individual substrate patches were carefully delimited at each site so that they were accessible to potential spawners in the fall and small enough to be homogenous in terms of water depth, flow velocity, substrate size (table 6.1).

The sampling design thus includes two sites with 5-6 patches per site each containing 5-6 cubes per patch over two years (N = 120 cubes over the two years). Note that in this

design, newly installed cubes (in October) do not have uniform sedimentology. Rather collectively, these cubes represent a large sample of fresh spawning redds incorporating natural variations due to variable spawning conditions in the channel (due to across-patch differences in initial sediment size, water depth and velocity at installation). In this study, variations in redd state (fines content) within patches tended to be smaller than the variations across patches and across sites. Comparisons for the same time period made across patches and across sites thus represent two scales of spatial variation in redd state. We assumed that within-patch comparisons of cubes extracted at successive times mostly capture temporal variations in redd state (an infiltration/flushing event of fine sediment at that patch), with a random noise effect due to minor spatial variations within a patch. The validity of this last assumption will be tested by comparing temporal trends across many patches in the same zone of the river bed. Since the random spatial variability within patches is not correlated across patches, if many nearby patches in a river site show similar increases (or decreases) in fine sediment content over the same period, this pattern is likely a true reflection of temporal change between successively extracted redds.

### **Bedload traps**

Each cube was paired with a circular bed load trap (diameter: 15 cm, depth: 20 cm, installed empty) (figure 6.4) buried flush with the bed surface. Each trap was originally installed with a cover. Removing its cover, thereby enabling bed load sampling for a predetermined period of time, activated a trap. At the time of installation, one infiltration cube per patch was removed immediately following burial to quantify the proportion of fines in the artificial redds of each patch at time zero. At the same time, the sediment trap associated with the next infiltration cube to be extracted was activated. Then, an infiltration cube and its associated bedload trap was removed from each patch (and a new sediment trap was activated) at each of the four other sampling moments.

### **Grain size analysis**

The coarser part of the sample ( $> 16$  mm) recovered from the infiltration cubes was wet sieved and weighed on the field and a well mixed sub-sample of the  $< 16$  mm fraction was taken for a standard sieve analysis in the laboratory, at 1 phi intervals. This study focuses on the fine sediment content of each cube (as a weight percentage of the entire sample) for four grain size fractions: medium-coarse sand (0.250-2 mm), fine sand (0.125-0.250 mm), very fine sand (0.063-0.125 mm) and silts ( $< 0.063$  mm).

### **Embryo survival**

Reproductive success for each patch was studied by inserting one hundred fertilised Atlantic salmon eggs in one of the five infiltration cubes installed in October. These cubes were removed in the spring during the projected egg hatching period. For the 2001-2002 incubation period, eggs were installed in 2 such cubes within each patch, thereby increasing the total number of cubes to 6 compared with 5 for the 2000-2001 incubation period. The eggs and milt were obtained from the Tadoussac hatchery. The eggs were of the same genetic stock as the Atlantic salmon adults native to the Sainte-Marguerite River. The eggs were fertilised and water-hardened at the hatchery (located approximately 25 km away from the river) and then transported to the field in cooled water-filled jars. The eggs were kept at the same temperature as the stream water to avoid thermal shock during artificial redd construction and infiltration cube installation. Within an artificial redd, the eggs were positioned approximately 20-25 cm below the surface, which is the typical range of burial depths for Atlantic salmon eggs (De Vries, 1997). All artificial redds were completed and eggs buried in the substrate within 24-hours of fertilization.

The hatching period was estimated from hourly-recorded substrate water temperature data used to extrapolate the degree-day hatching threshold for Atlantic salmon published by MAPAQ (1996). The infiltration cubes containing embryos were extracted from the bed

at a time when it was determined that the embryos had hatched but prior to emergence to prevent the possible loss of emerging fry. Immediately following extraction, these cubes were carefully inspected using rinsing water, to recover and count the number of dead and live embryos. Survival to hatching in an artificial redd was determined by calculating the ratio of recovered fry (dead or alive) to the total number of recovered embryos (fry + dead eggs), as opposed to the number initially buried. While we acknowledge the possibility of overestimating survival as noted by Pauwels and Haines (1994), we prefer this method because the cause of egg disappearance is unknown. Once all embryos and fry from a cube were recovered and counted, the substrate was analyzed for fine sediment content using the procedure described above.

## **Results**

### **Seasonal characteristics and recovery success**

Figure 6.5 shows the hydrograph for each sampling year, over which is indicated the ice cover period along with the cube sampling dates. The sampling dates differ between years due to variable environmental factors. During the first year of the study, the sampling planned for the period prior to the formation of a stable ice cover was missed due to early ice formation. During the second year, the first sampling began November 11<sup>th</sup>, while it occurred on October 26<sup>th</sup> the previous year. This delay in the second year was due to successive autumn freshets and late spawning activity. The last, post-flood sampling date (June 16<sup>th</sup>) was relatively late in the second year; persistent high water levels following the spring flood made it impossible to recover the infiltration cubes earlier. This delay also negatively affected embryo survival. The embryo recovery success defined as the total number of embryos recovered from all the cubes was lower (38.7 %) for the second year of sampling than for the first year (68.3 %). In the second year, pre-emerging fry either left the redd to avoid being crushed by pavement mobilization or were simply

scoured from the bed. Due to the poor embryo recovery success of the second year, only the embryo survival data from the first year of sampling will be considered.

The rate of cube recovery was high. During the first year of sampling, only three of the sixty cubes were not recovered. This was for the winter period; these cubes were frozen in the river bed and their extraction was impossible. During the second year of sampling, only one cube out of sixty was lost and it was at the end of the incubation period. The cube was probably washed from the bed during the spring flood. The recovery rate of the sediment traps was also good. However, after the spring flood of the first sampling year, many sediment traps were full at both sites. To overcome this problem, larger traps were used the second year but many traps were saturated again. Therefore, for both years of sampling, estimated volumes for bedload transport represent minimal values. Finally, at the end of the second spring sampling period, four of five sediment traps at the Glass Pool site were not recovered. They were transported from the bed by the spring flood.

Table 6.2 presents statistics on the relative variability (standard deviations, SD and Coefficients of Variation, CV) in the different fines fractions within the entire data set (across all cubes, including all sites, seasons and years). This data set of fines content over multiple artificial redds at different time periods, captures a large range of sand and silt contents (*e.g.* < 2 mm range: 0.4-27 % and silt range: 0.04-0.72 %, table 6.2). Although absolute variations (SD) in coarser fractions are larger, the finest fractions are relatively more variable (in terms of CV) over the entire data set than the coarser sand fractions. The coefficients of variation of both the silt (< 0.063 mm) and the fine sand (0.125-0.250 mm), but not the very fine sand (0.063-0.125 mm), are almost twice as over 75 % that of the coarse sand fraction (0.250-2 mm) at 42 %. This suggests that, if they are shown to be biologically significant, important variations in these finest fractions across redds need to be studied.

### Effects of different fine sediment fractions on embryo survival to hatching

Results presented in this section are based on the 1 or 2 cube samples in each patch that were emplaced with fertilised eggs in October and extracted at the end of the incubation period (*i.e.* late May or June). Despite the large variations in sand content across all patches (table 6.2), simple metrics of overall fine contents, which do not focus on silts and the finest sands, were not correlated with embryo survival. Figure 6.6 shows wide scatter and no significant relationships between percent survival to hatching and either the variation in Peterson and Metcalfe's (1981) Sand Index SI (figure 6.6A) or total percent of sediment < 2 mm (figure 6.6B). However, detailed analysis reveals that survival is strongly associated with variation in the fraction under 0.125 mm. We subdivided the overall sand < 2 mm into 4 fractions: medium-coarse sand (MCS 0.250-2 mm), fine sand (FS 0.125-0.250 mm), very fine sand (VFS 0.063-0.125 mm) and Silt (< 0.063 mm). The percent of FS, of VFS and of Silt in the substrate are each significantly negatively correlated with percent survival, with a  $R^2 = 0.61$ ,  $p < 0.05$  for the VFS fraction, a  $R^2 = 0.5$ ,  $p < 0.05$  for the Silt fraction and  $R^2 = 0.3$ ,  $p < 0.05$  for the FS fraction. However, the two finest fractions (Silt and VFS) are strongly inter-correlated ( $R^2 = 0.9$ ,  $p < 0.0001$ ) therefore their independent effects on survival cannot be separated based on this data set. This compelled us to examine the dependency of embryo survival with the percent of VFS and Silt combined, a fraction (< 0.125 mm) we will call SVFS (Silt and Very Fine Sand). Figure 6.7 shows a strong and significant relationship ( $R^2 = 0.85$ ,  $p < 0.001$ ) between these two variables. The percentage of SVFS appears to have a negative impact on embryo hatching probability. Survival falls below 50 % for all samples with greater than 0.2 % of fines under 0.125 mm.

The impact of patch-scale fine sediment content at various sampling moments on final embryo survival in the spring cannot be directly tested as it is impossible to repeatedly sample the same redd without disturbing the incubating eggs (*cf* methods). However, we regressed hatching success data at incubation cubes against fines content from cubes that

had been extracted at previous times in the same patch (*i.e.* autumn, early and late winter). This analysis shows no significant relationships between embryo survival and variations of any of the fine fractions over these earlier periods on the same patch.

### **Seasonal evolution of fine sediment content at the patch scale**

Table 6.3 lists the mean, within-patch coefficients of variation for each fine fraction. The mean patch-scale CV was calculated by averaging the CVs computed from 5-6 cubes extracted at different times within any given patch, for any site and sampling year. In general, the silt and very fine sand fraction (SVFS) and Fine sands (FS) are the most variable (CV of 35-60 %) across cubes extracted at different times during the incubation period within a small homogeneous patch, while Medium and Coarse Sands (MCS) and total < 2 mm fractions are relatively less variable (CV of 17-26 %). Additionally, in both sampling years, these fine sediment fractions generally vary more during the incubation period on the Glass Pool site than on the Bras des Murailles site.

Figure 6.8 illustrates the seasonal evolution of SVFS, the fraction that best explains survival data, for all cubes recovered throughout the incubation period for each site and sampling year. Differences in SVFS content (in percent mass with respect to the total cube sample) are determined between nearby pairs of successively extracted cubes (*i.e.* covering one sampling period) for each patch. Positive differences (increases over the period) represent potential infiltration and negative differences, flushing of SVFS from the substrate for the sampling period. As explained in the methods, all these temporal change estimates are marred by some unquantified random noise due to spatial variations between cubes in the same patch. Boxplots show, for any given site and time interval, the mean, standard error and standard deviation of these differences over all patches. Note that a difference of 0.1 % in fine sediment content in a patch over a time period is well above detection level as it represents a change of 60 g in that fraction over a typical 60 kg cube content.

Overall, figure 6.8 illustrates relatively coherent temporal patterns affecting most patches at any site. Systematic SVFS gains (infiltration) tend to occur in most patches over the first three periods (fall and over winter), for both sites and years. A difference in behaviour between the two sites is notable however over the spring, high flow sampling period, when SVFS flushing dominated in most patches of the Glass Pool site in both years (figure 6.8A and C) while infiltration dominated in most patches of the Bras des Murailles site (figure 6.8B and D). Figure 6.8 also shows that SVFS content is more variable at the Glass Pool site than the Bras des Murailles site both seasonally (mean changes over sampling periods are higher) and spatially (more spread out over patches for any given period). Also, infiltration and flushing variations of SVFS are somewhat stronger at both sites in the first sampling year (figure 6.8A and B), than in the second sampling year (figure 6.8C and D). Finally, note that some boxplots (*e.g.* figure 6.8C, late winter) show that infiltration and flushing of SVFS both occur in different patches during the same sampling period, possibly reflecting spatial variations in hydraulic and sedimentary conditions dependent on lateral patch location on the site (*cf* figure 6.3).

Figure 6.9 shows the variation in bedload transport competence (as  $D_{max}$  of the bedload) over each sample period for both sites and sampling years. Each box represents the mean, standard error, and standard deviation of the  $D_{max}$  for the sediment traps opened at the beginning and extracted at the end of each sampling period for each patch. The grey zones represent bed material  $D_{50}$  (median size) at both sites where the upper limit of the zone corresponds to the coarsest patch (highest patch mean  $D_{50}$ , based on analysis of extracted cubes) and the lower limit, the finest patch (lowest patch mean  $D_{50}$ ) of the site. This grey zone is useful as an approximate grain size reference to distinguish phase 1 (fine particle) bed load events from phase 2 (pavement mobilizing) events. Data points above the grey zone thus represent more powerful sediment transport events allowing extensive bed substrate mobilization ( $D_{max}$  bedload  $>$   $D_{50}$  bed), while the lower part is linked with low bedload transport events not high enough to allow pavement mobilization ( $D_{max}$  bedload  $<$   $D_{50}$  bed).

Figure 6.9 reveals an overall trend of low intensity bedload transport during the first 3 sampling periods, at both sites and both sampling years. For both sites and years, the spring period is characterized by  $D_{max}$  values greater than ambient bed, mean grain sizes, indicating phase 2 bedload transportation. This period is characterized by extreme hydraulic events (*cf* figure 6.5A and B). However, the autumn period was characterized by a more complex pattern of bedload transport for both sites and years. The second fall period shows  $D_{max}$  boxplots that straddle the grey zone. Therefore, over the same site, flow at some patches appears to have been relatively more competent than at other patches, underlining between-patch spatial variations in sedimentary processes at a site.

Consider figures 6.8 and 6.9 together, we see that periods with low transport competence (figure 6.9: autumn, early and late winter) tend to correspond to periods of SVFS infiltration at most patches. However, the picture is more complex for the spring period, where very high transport competence events at patches can be associated with SVFS flushing (at Glass Pool, figure 6.8) or infiltration (at Bras des Murailles). Figure 6.10 presents in more detail the relationship of SVFS variations and sediment trap  $D_{max}$  for both sites and years at the patch scale. Although there is much scatter with high  $D_{max}$  values, there is an overall negative relationship between flow competence and change in fines content. For periods with small  $D_{max}$  values (*i.e.* under 20 mm, figure 6.10), SVFS generally infiltrates the substrate. However, for periods with  $D_{max}$  greater than 20 mm, SVFS can either increase or decrease, depending on site conditions. There is a significant difference between the mean percent SVFS for the group  $D_{max} < 20$  mm and the group  $D_{max} > 20$  (t-test  $p = 0.012$ ).

Figure 6.11 shows the temporal variation of percent SVFS content in the infiltration cubes during the incubation period by patch for both sites and sampling years. Each point represents the SVFS content of an infiltration cube extracted at a different sampling moment throughout the incubation period. The spring period saw some patches with SVFS flushing while others are characterized by infiltration (figure 6.11). This confirms

the variability of SVFS infiltration and flushing in the spring as noted in figures 6.8C and D. Figure 6.11A also confirms the predominance of flushing on the Glass Pool site for the first sampling year (noted on figure 6.8A), because 4 out of 5 patches show high negative slopes for this site (year 1).

Figure 6.11 in conjunction with figure 6.3 reveals coherent spatial trends in SVFS content evolution between neighbouring patch subsets, particularly over the spring sampling period. For example, in year 1, patches 3, 4 and 5 at Glass Pool (figure 6.11A), all located on the left side of the channel (the outside with respect to curvature, figures 6.1A and 6.3 A), show clear reductions in SVFS over the spring period. The same occurs for patch 5 in year 2 (figures 6.11B and 6.1A and 6.3A). Conversely, patches 1 (Year 1) and 1, 2, 3 (Year 2) are all located on the right, inside half of the channel and all undergo an increase in fine sediment over the spring period.

The situation is more complex at the Bras des Murailles site, where fine sediment accumulates along a lateral bar, on the right bank located at the exit of an oxbow, during flood recession (*cf* figures 6.1B and 6.3B). Patch proximity to this fine sand and mud rich bar seem to control patterns of fines infiltration or flushing in the spring at this site. Fines increase strongly over the spring period at patches 1, 4 and 5 (year 1) and patches 2 and 6 (year 2) which are all located near both the oxbow exit and side bar. Fines decrease at patches 2, 3 (year 1) and 4 (year 2) which are located in the deeper, more central part of the channel or closer to the left bank, away from this fine sediment accumulation area. These coherent patterns demonstrate the importance of redd location within the study site as a control on temporal variations of fine sediment present in the substrate during the high flow period.

## Discussion

### Effects of silt and very fine sand fractions on embryo survival

Our results confirm the effect of natural variations in fine sediment content on Atlantic salmon embryo survival. We found that it is the finest alluvial fractions ( $< 0.125$  mm) that are most detrimental to survival on the Ste-Marguerite River spawning sites. Although these finest fractions are hard to measure accurately in river substrate and their weight rarely exceed 1 % of the redd, their proportion appears to be quite spatially and temporally variable (table 6.3). These variations appear to play an important role in determining embryo survival.

These results expand upon previous laboratory incubation findings that highlighted the sensitivity of embryo survival to very small silt contents, in the 0.5-1.5 % range (Lapointe *et al.*, 2004). Figure 6.7 shows that 85 % of the variation in embryo survival to hatching was explained by the proportion of SVFS ( $< 0.125$  mm) in redds and that other grain size variables do not add significantly to the prediction. Redds with more than 0.2 % of this sediment fraction had less than 50 % survival.

Although a large variations in sand content ( $< 2$  mm ranged from 6 to 20 %) and Sand Index (0.5 to 1.6) were present in our redd data set, figure 6.6 shows no clear effect of these variables on survival to hatching for both sites. In particular figure 6.6A shows a wide scatter in survival, ranging from 10 % to 100 % in redds with Sand Index values over 1.0 (Peterson and Metcalfe's (1981) upper threshold for acceptable spawning substrate). This suggests that finer sediment fractions than those contained in the Sand Index (sand fractions coarser and finer than 0.5 mm) need to be taken into account as a sedimentary control in the incubating environment.

### **Spatial and temporal controls on infiltration and flushing of silts and very fine sands**

Our results show that in the two spawning sites the biologically significant SVFS fractions within redds, although less abundant than coarser sand fractions, had higher coefficients of variation in space and time (*cf* tables 6.2 and 6.3). The overall pattern of variation was of gradual accumulation of the SVFS at most sites during low flows. Accretion rates were especially marked during the early or late winter periods of ice cover, where the mean accumulation rate of the fraction  $< 0.125$  mm in redds reached 0.1-0.2 % of substrate mass (*cf* figures 6.5, 6.8 and 6.11). As expected (Lisle and Hilton, 1999), flushing of this fraction ( $< 0.125$  mm) from redd substrate was observed in places during high flow pavement-mobilizing events (figures 6.8 and 6.10). Local controls on the supply of these very fine fractions, as well as typical secondary circulation patterns within asymmetric meander cross-sections, appear to also influence variations in redd content during the spring break-up and peak runoff periods.

At the Glass Pool site, we observed a pattern of flushing of the  $< 0.125$  mm fraction in redds located towards the outside of the bend and accretion on the inside, nearer the point bar. This differential pattern is consistent with sand scour on high-velocity zones and accretion over low velocity zones of spawning riffles noted by Payne and Lapointe (1997). At the Bras des Murailles, an anomalous oxbow connection close to the redds modified these relationships. Despite the occurrence of pavement mobilizing flows both years (figure 6.9B and D), SVFS ( $< 0.125$  mm) accumulated in most redds close to the perturbation caused by the oxbow (figures 6.3B, 6.11C and D). The results indicated that spatial variations associated with differences in supply and infiltration potential of the finest fractions ( $< 0.125$  mm) are important considerations for spawning habitat management and conservation.

## **Acknowledgements**

We would like to thank our partners: Fonds des Priorités Gouvernementales en Science et en Technologie (FPGST-E), Centre Interuniversitaire de Recherche sur le Saumon Atlantique (CIRSA), Association rivière Ste-Marguerite, Faune et Parcs Québec (FAPAQ), and Pisciculture de Tadoussac. The research was partially funded by a discovery grant from the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) to Normand Bergeron. Special thanks to André Boivin, Marc-André Pouliot, Josérito Savard and Véronique Thériault for their assistance in the field and to Julie Smith for her comments on earlier drafts. The Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) provided a postgraduate scholarship to Mylène Levasseur.

## References

- Acornley, R.M. and Sear, D.A. (1999). Sediment transport and siltation of brown trout (*Salmon trutta L.*) spawning gravels in chalk streams. *Hydrological Processes* (13): 447-458.
- Beltaos, S., Calkins, D.J., Gatto, L.W., Prowse, T.D., Reedyk, S., Scrimgeour, G.J. and Wilkins, S.P. (1993). Physical effects of river ice. In: Prowse, T.D. and Gridley, N.C. (eds.) *Environmental aspects of river ice*. Chapter 2, pp. 31-60.
- Beschta, R.L. and Jackson, W.L. (1979). The intrusion of fine sediments into a stable gravel bed. *Journal of the Fisheries Resource Board of Canada* (36): 204-210.
- Crisp, D.T. (1993). The ability of U.K. salmonid alevins to emerge through a sand layer. *Journal of Fish Biology* (43) : 656-658.
- DeVries, P. (1997). Riverine salmonid egg burial depths: review of published data and implications for scour studies. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (54): 1685-1698.
- Everest, F.L., Beschta, R.L., Scrivener, J.C., Koski, K.V., Sedell, J.R. and Cederholm, C.J. (1987). Fine sediment and salmonid production: a paradox. In: Salo, E.O. and Cundy, T.W. (eds.) *Streamside management: forestry and fishery interactions*. University of Washington, College of forest resources, Cont. No. 57. Seattle. pp. 98-142.
- Harmor, T. and Garside, E.T. (1976). Developmental rates of embryos of Atlantic salmon, *Salmo salar L.*, in response to various levels of temperature, dissolved oxygen and water exchange. *Canadian Journal of Zoology* (54): 1912-1917.
- Kamler, E. (1992). Early life history of fish: an energetic approach. Chapman & Hall, Fish and Fisheries Series. London. 267 pages.
- Kondolf, G.M., Sale, M.J. and Wolman, M.G. (1993). Modification of fluvial gravel size by spawning salmonids. *Water Resources Research* (29), no.7: 2265-2274.
- Kondolf, M. (2000). Assessing salmonid spawning gravel quality. *Transactions of the American Fisheries Society* (129): 262-281.

- Lapointe, M.F., Bergeron, N.E., Bérubé, F., Pouliot, M-A. et Johnston, P (2004). Interactive effects of substrate sand and silt contents, redd-scale hydraulic gradients and interstitial velocities on egg to emergence survival of Atlantic salmon. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (61) : 2271-2277.
- Levasseur, M., Bérubé, F. and Bergeron, N. (2006). A field method for the concurrent measurement of fine sediment content and embryo survival in artificial salmonid redds. *Earth Surface Processes and Landforms* (31): 526-530.
- Lisle, T.E. (1989). Sediment transport and resulting deposition in spawning gravels, north coastal California. *Water Resources Research* (25): 1303-1319.
- Lisle, T.E. and Lewis, J. (1992). Effects of sediment transport on survival of salmonid embryos in a natural stream: a simulation approach. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (49): 2337-2344.
- Lisle, T.E. and Hilton, S. (1999). Fine bed material in pools of natural gravel bed channels. *Water Resources Research* (35), no. 4: 1291-1304.
- MAPAQ (1996). Guide d'élevage des salmonidés. Fascicule 3: Reproduction, incubation and alevinage, Chapitre 3.5: L'incubation, pp. 38-44.
- Montgomery, D. R., Buffington, J.M., Peterson, N.P., Schuett-Hames, D. and Quinn, T.P. (1996). Stream-bed scour, egg burial depths and the influences of salmonid spawning on bed surface mobility and embryo survival. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (53): 1061-1070.
- Pauwels, S.J. and Haines, T.A. (1994). Survival, hatching, and emergence success of Atlantic salmon eggs planted in three Maine streams. *North American Journal of Fisheries Management* (14): 125-130.
- Payne, B.A. and Lapointe, M.F. (1997). Channel morphology and lateral stability: effects on distribution of spawning and rearing habitat for Atlantic salmon in a wandering cobble-bed river. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (54), no.11: 2627-2636.
- Peterson, R.H. and Metcalfe, J.L. (1981). Emergence of Atlantic salmon fry from gravels of varying composition: a laboratory study. *Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences* (1020). 28 pages.

- Prowse, T.D. (1994). Environmental significance of ice to stream flow in cold regions. *Freshwater Biology* (32): 241-259.
- Reiser, D.W. and White, R.G. (1988). Effects of two sediment size classes on survival of steelhead and chinook salmon eggs. *North American Journal of Fisheries Management* (8): 432-437.
- Stuart, T.A. (1953). Water currents through permeable gravels and their significance to spawning salmonids. *Nature* (172): 407-408.
- Talbot, T. and Lapointe, M. (2002a). Modes of response of a gravel bed river to meander straightening: The case of the Sainte-Marguerite River, Saguenay Region, Quebec, Canada. *Water Resources Research* (38), no.6: 10.1029/2001WR000324.
- Talbot, T. and Lapointe, M. (2002b). Numerical modeling of gravel bed river response to meander straightening: The coupling between the evolution of bed pavement and long profile *Water Resources Research* (38), no.6: 10.1029/2001WR000330.
- Turnpenny, A.W.H. and Williams, R. (1980). Effects of sedimentation on the gravels of an industrial river system. *Journal of Fish Biology* (17) : 681-693.
- Vukovic, M. and Soro, A. (1987). Determination of hydraulic conductivity of porous media from grain-size composition. Water Resources Publications, Littleton, Colorado, pp.83.
- Zimmerman, A and Lapointe, M.F. (2005). Intergranular flow velocity through salmonid redds: sensitivity to fines infiltration during low intensity sediment transport events. *River Research and Applications* (21) : 865-881.

Table 6.1 Physical characteristics for each site sampled after the spawning period in both years.

Site (year)	Patch	D50 (mm)	Depth (cm)	Velocity (cm/s)
Glass Pool (Yr 1)	1	14.8	17	34.5
	2	17.3	45	25.9
	3	23.9	49	33.2
	4	26.5	43	47.9
	5	35.6	34	46.6
	<b>Mean</b>	<b>23.6</b>	<b>37.6</b>	<b>37.6</b>
Glass Pool (Yr 2)	1	19.4	39*	nd
	2	25.0	nd	nd
	3	28.7	42*	nd
	4	36.2	43*	nd
	5	33.4	26*	nd
	<b>Mean</b>	<b>28.5</b>	<b>37.5</b>	<b>nd</b>
Bras Muraille (Yr 1)	1	29.4	42	38.4
	2	23.6	39	52.0
	3	15.5	32	35.5
	4	17.2	28	28.6
	5	25.0	50	30.9
	<b>Mean</b>	<b>22.1</b>	<b>38.2</b>	<b>37.1</b>
Bras Muraille (Yr 2)	1	18.6	49*	nd
	2	21.4	51*	nd
	3	25.8	49*	nd
	4	18.0	51*	nd
	5	21.8	42*	nd
	6	29.0	39*	nd
	<b>Mean</b>	<b>22.4</b>	<b>46.8</b>	<b>nd</b>

\* Sampled in February.

Table 6.2 Statistics of the relative variability (standard deviation (SD) and coefficient of variation (CV)) in the different fine sediment fractions within the entire data set (all cubes, all sites, all periods and all years).

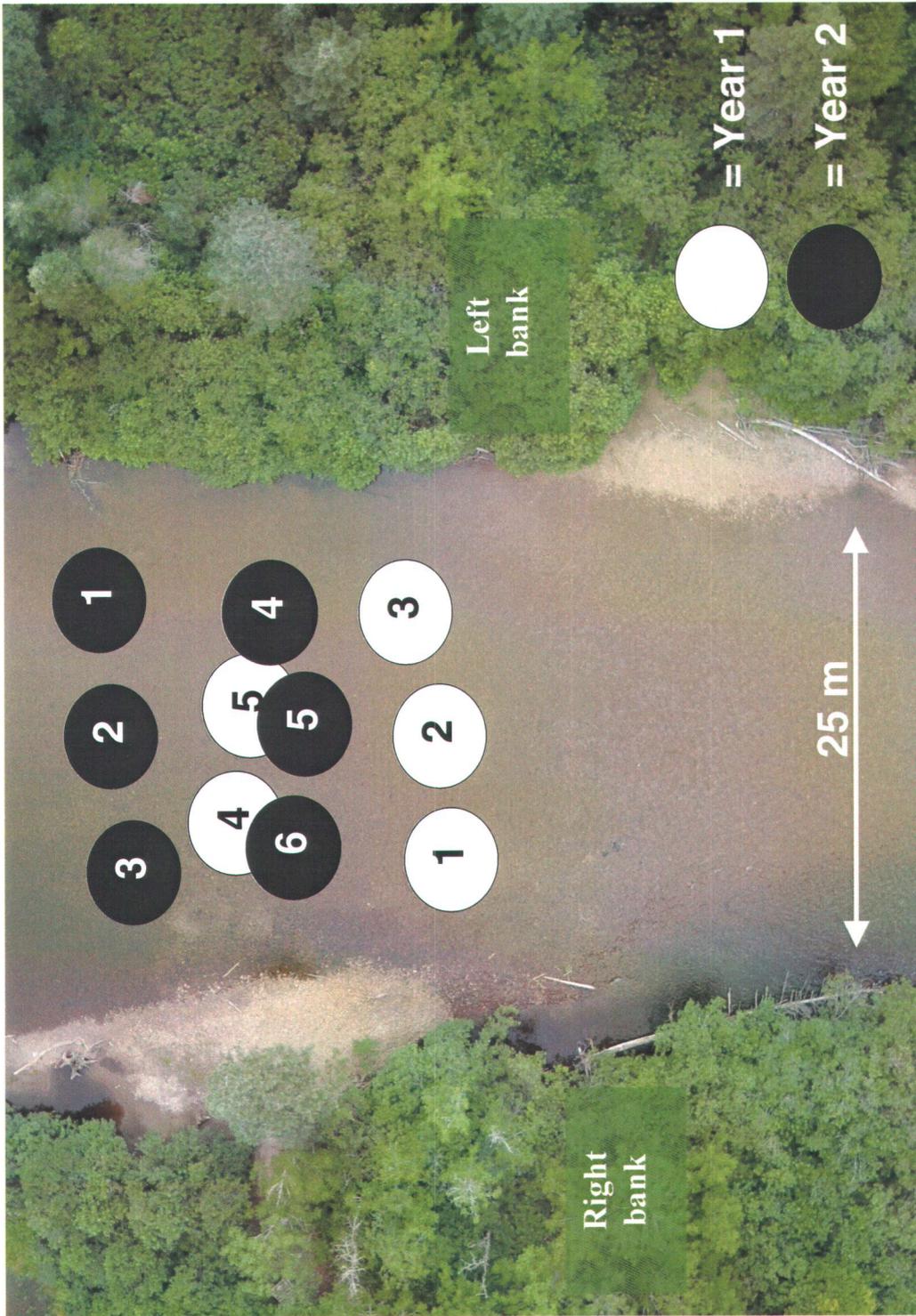
		Coarse sand	Fine sand	Very fine sand	Silt
	< 2 mm	0.250-2 mm	0.125-0.250 mm	0.063-0.125 mm	< 0.063 mm
SD	5.3	5.2	0.08	0.32	0.13
Mean (%)	13.2	12.3	0.11	0.70	0.16
CV (%)	40	42	77	46	85
Min (%)	0.4	0.4	0.02	0.12	0.04
Max (%)	27	26	0.5	1.6	0.72

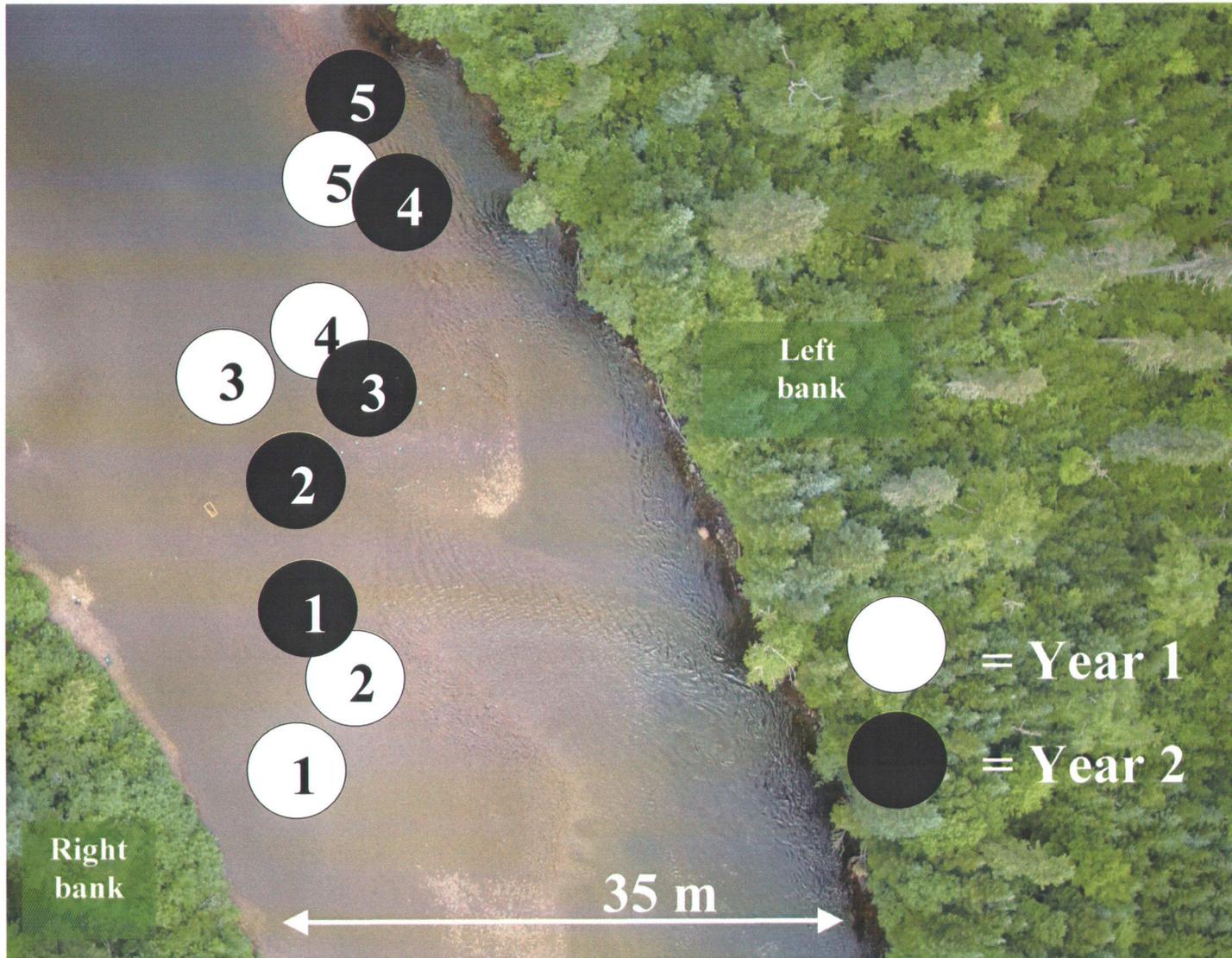
Table 6.3 Coefficient of variation (CV) of the temporal variation for each fine sediment fractions for the two sites and the two years of sampling.

Site	Year	Coefficient of variation, CV (%)			
		< 2 mm	Medium-Coarse sand (0.250 to 2 mm)	Fine sand (0.125 to 0.25 mm)	SVFS* (< 0.125 mm)
Glass Pool	Yr 1	19.4	20.1	42.6	60.1
	Yr 2	27.8	26.6	47.6	48.3
Bras des Murailles	Yr 1	18.4	18.9	37.2	34.1
	Yr 2	17.8	17.7	43.1	40.8
	<b>Mean</b>	<b>20.9</b>	<b>20.8</b>	<b>42.6</b>	<b>45.8</b>

\* SVFS : Silt and Very Fine Sand.

B)

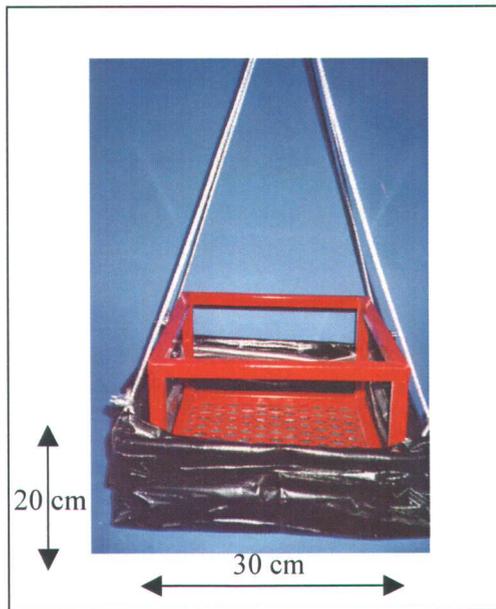




A)

Figure 6.3 Spatial location of the different patches for the two sampling year on A) Glass Pool site B) Bras des Murailles.

A)



B)



Figure 6.2 A) Infiltration cube B) Infiltration cube extracted during the late winter period.

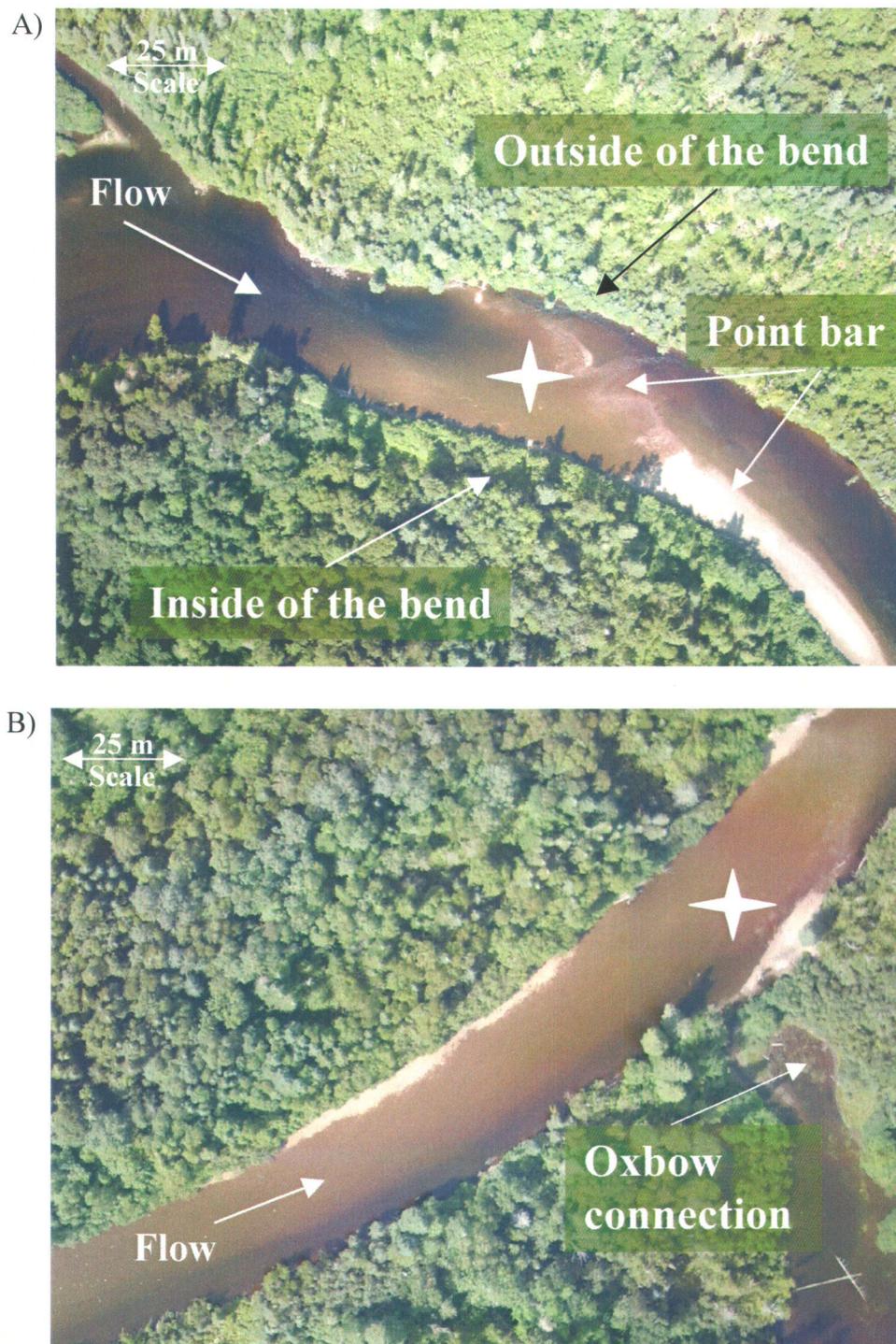


Figure 6.1 High altitude airborne photography of the two study sites. A) Glass Pool B) Bras des murailles. ★ Represents the specific location of the sites.

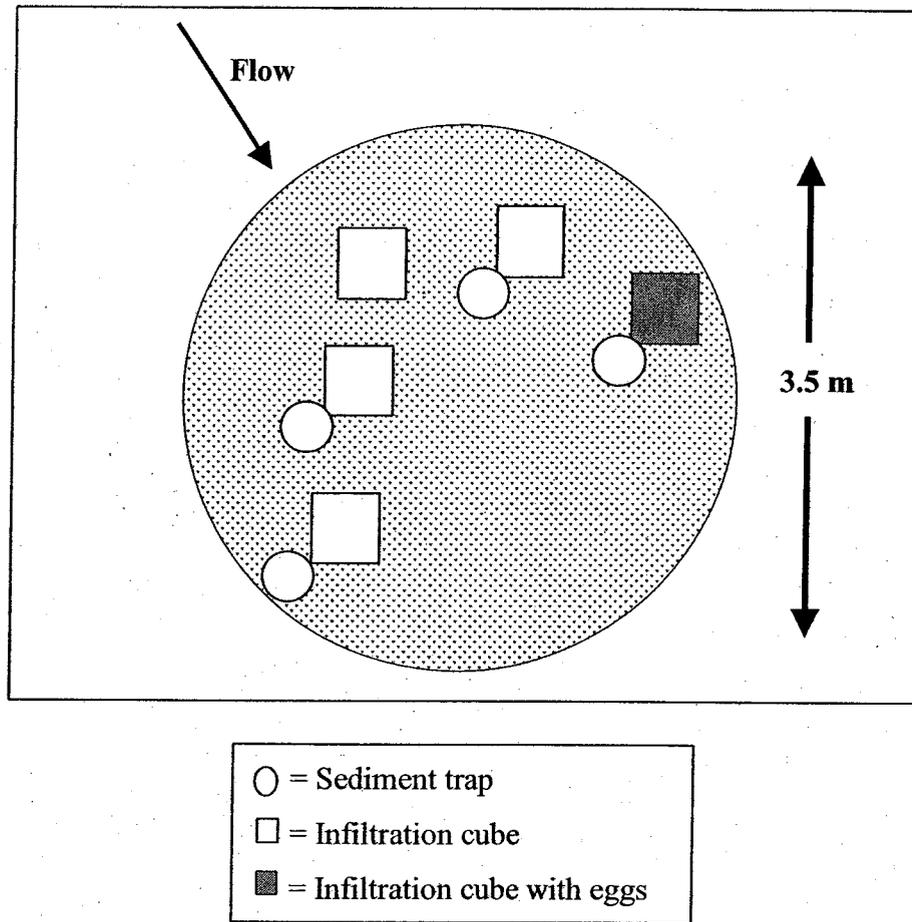


Figure 6.4 Typical patch with location of infiltration cubes and sediment traps.

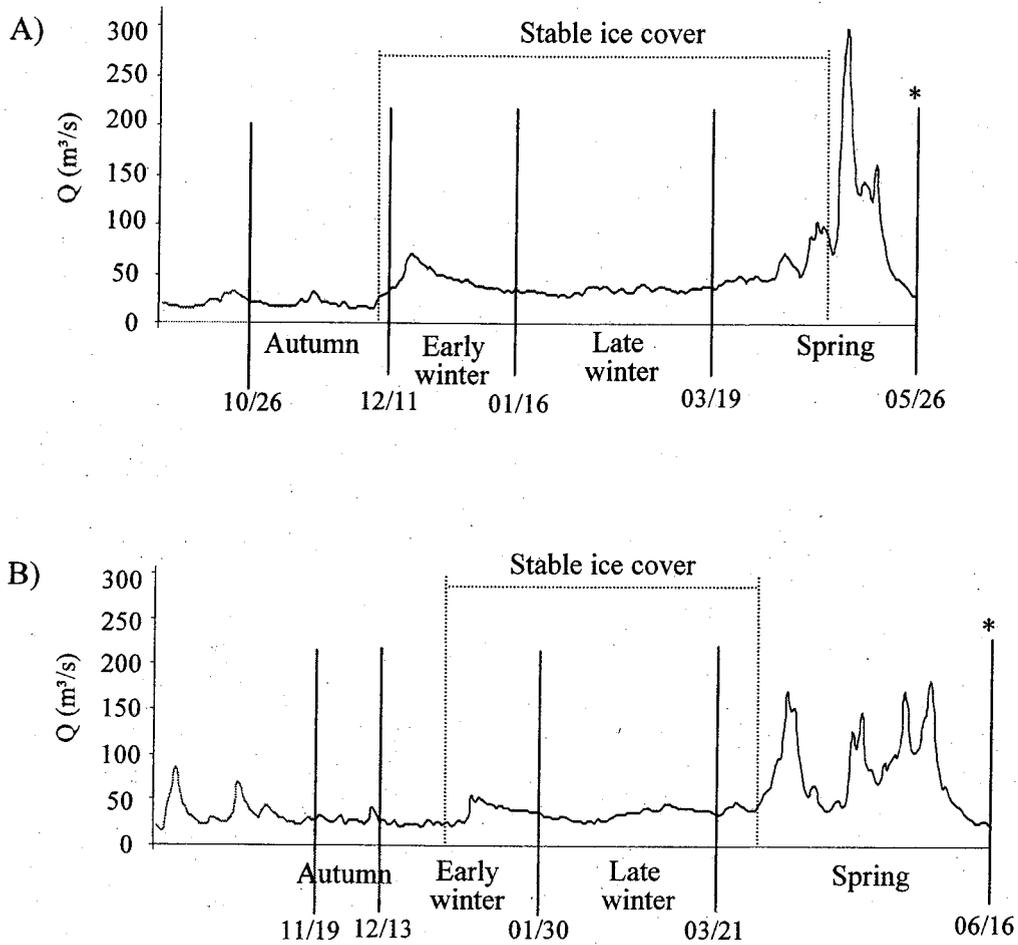
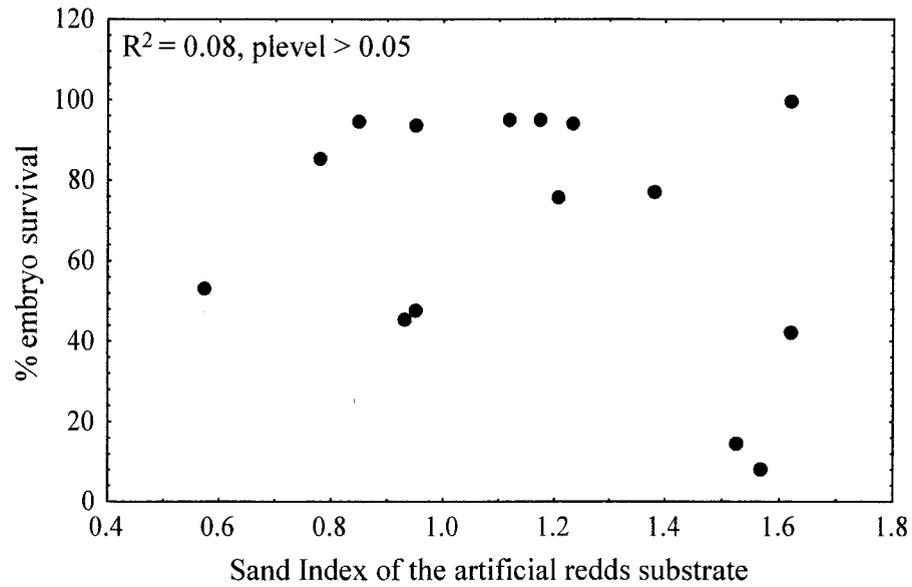


Figure 6.5: Daily discharge (Q) during the incubation period from a regional gauge (#062803, NE Ste-Marguerite River). Flow rate was not corrected for the period associated with the presence of a stable ice cover. Data for this period are somewhat overestimated. Vertical lines represent the sampling dates when the infiltration cubes and bedload traps were recovered. \* corresponds to the sampling date for the recovery of the infiltration cubes with eggs.

A)



B)

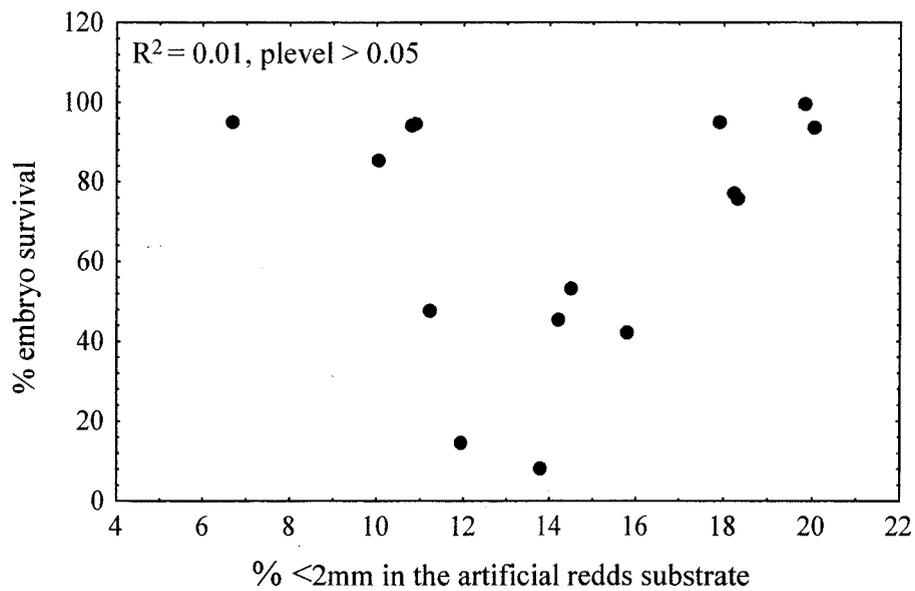


Figure 6.6 Relationship between A) Sand Index of the artificial redds substrate and % embryo survival and B) % <2mm in the artificial redds substrate and % embryo survival.

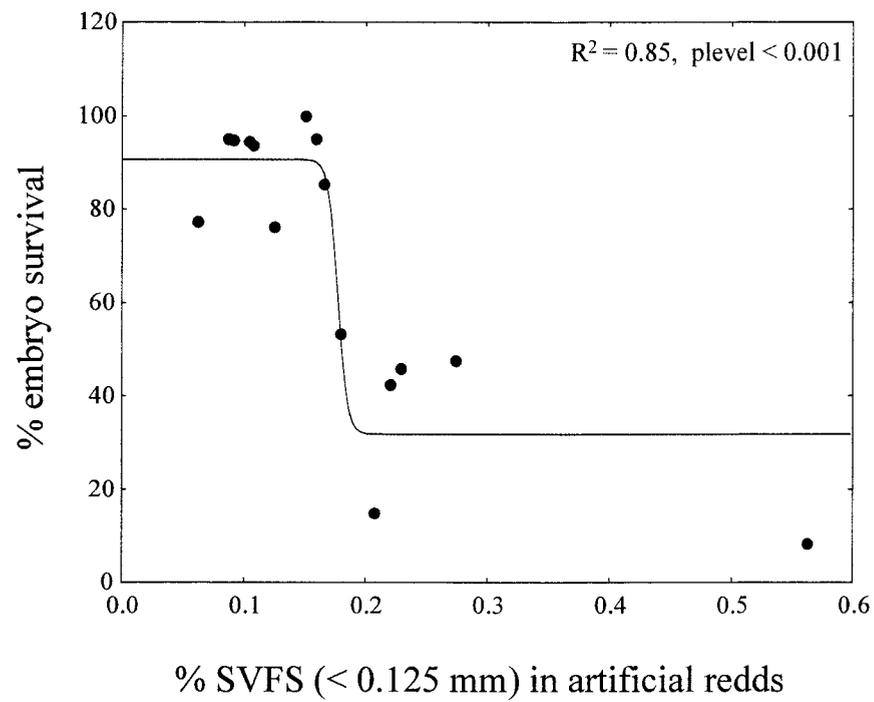


Figure 6.7 Relationship between % of SVFS (Silt and very fine sand) in artificial redds and % embryo survival.

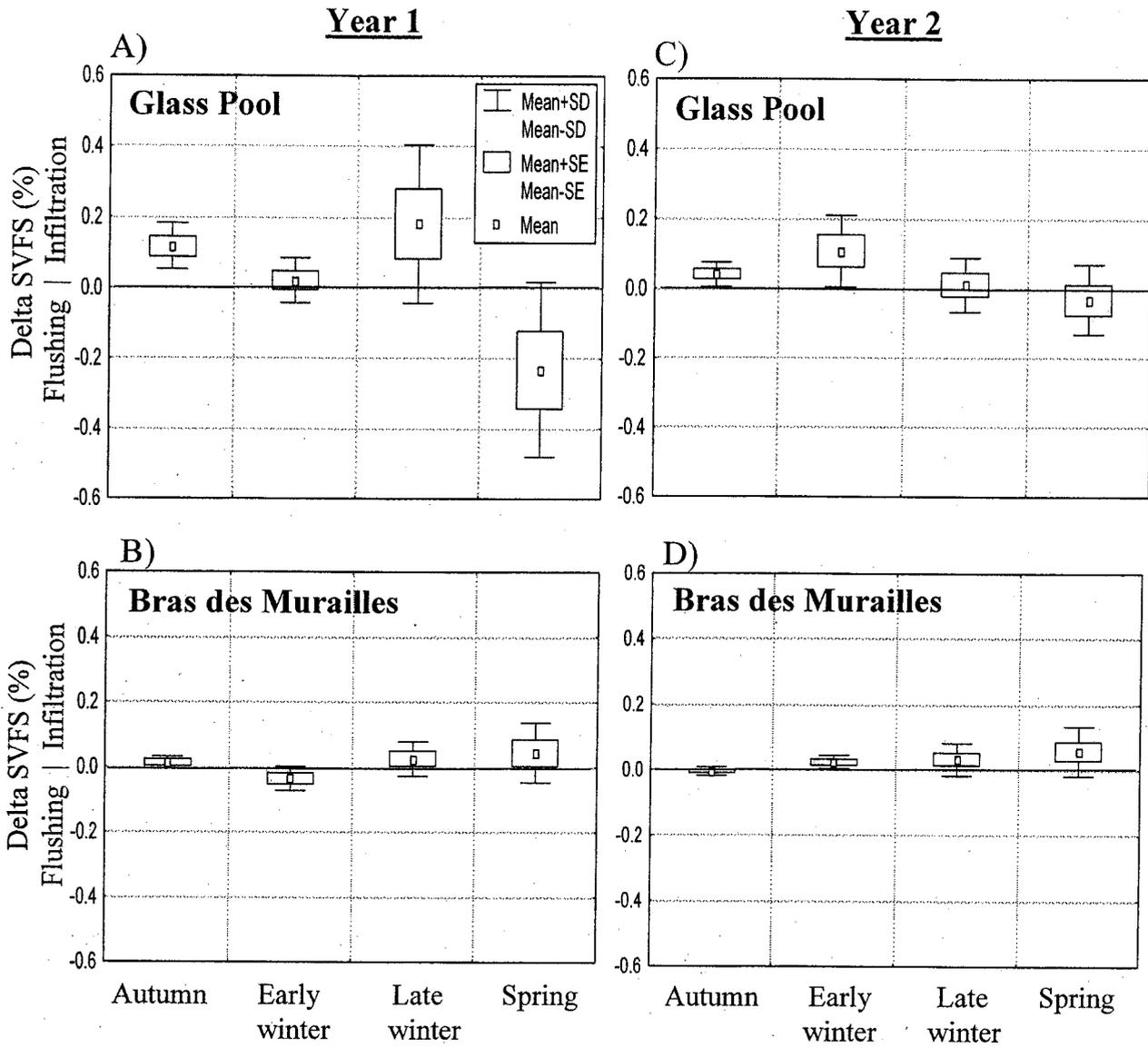


Figure 6.8: Temporal variations of infiltration and flushing of SVFS during the incubation period for both sites and sampling years. Each box represents the MEAN+/-SE (standard error) of the difference of SVFS content between two sampling periods for all homogenous patches of a study site. The upper part of the graph is associated with infiltration while the lower part is associated with flushing of SVFS from the artificial redds.

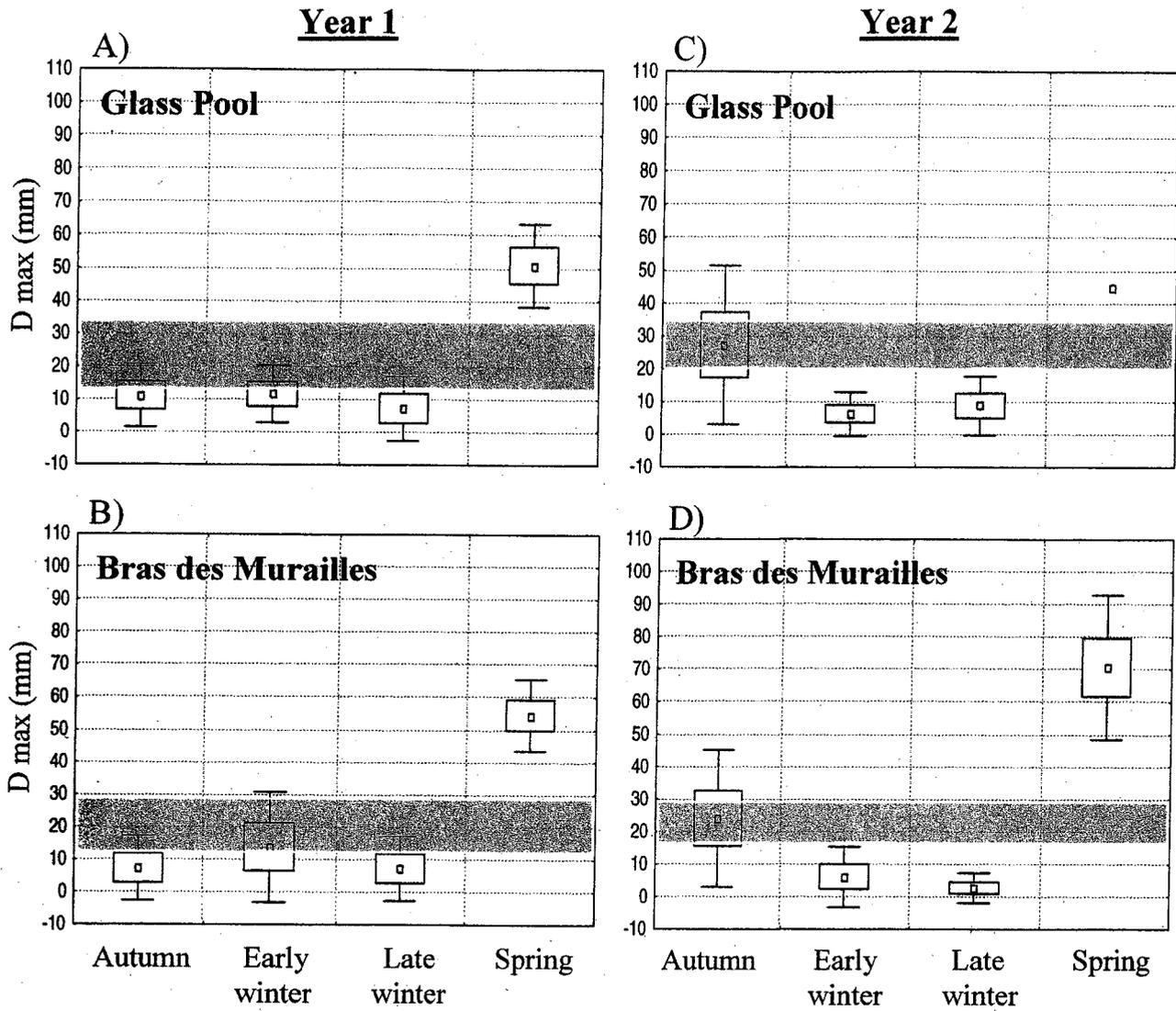


Figure 6.9: Temporal variations of Dmax of the sediment traps during the incubation period. The grey zone represent the minimum and the maximum of the mean D50 of all patches. Upper part of this zone correspond to Dmax > D50 and lower part of this zone correspond to Dmax < D50.

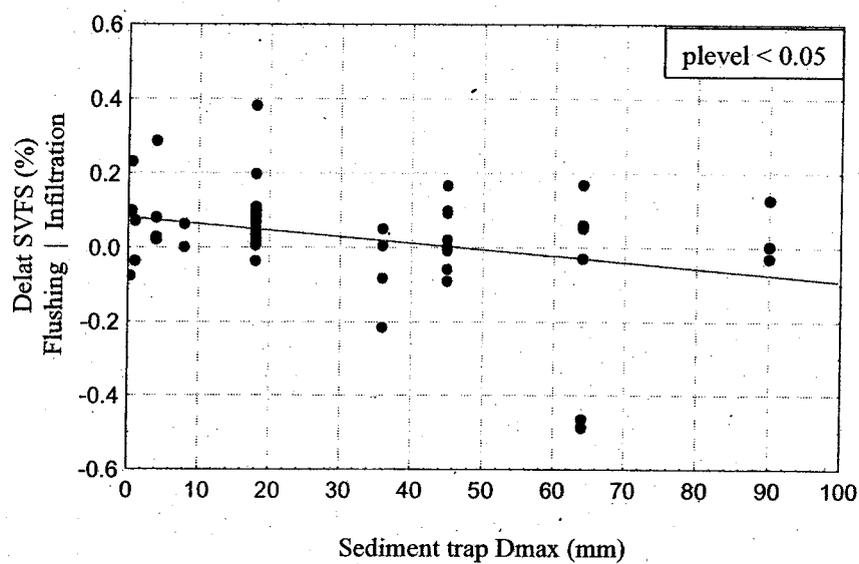


Figure 6.10 Relationship between infiltration and flushing of % SVFS and sediment trap Dmax of both sites and years of sampling for all the sampling periods.

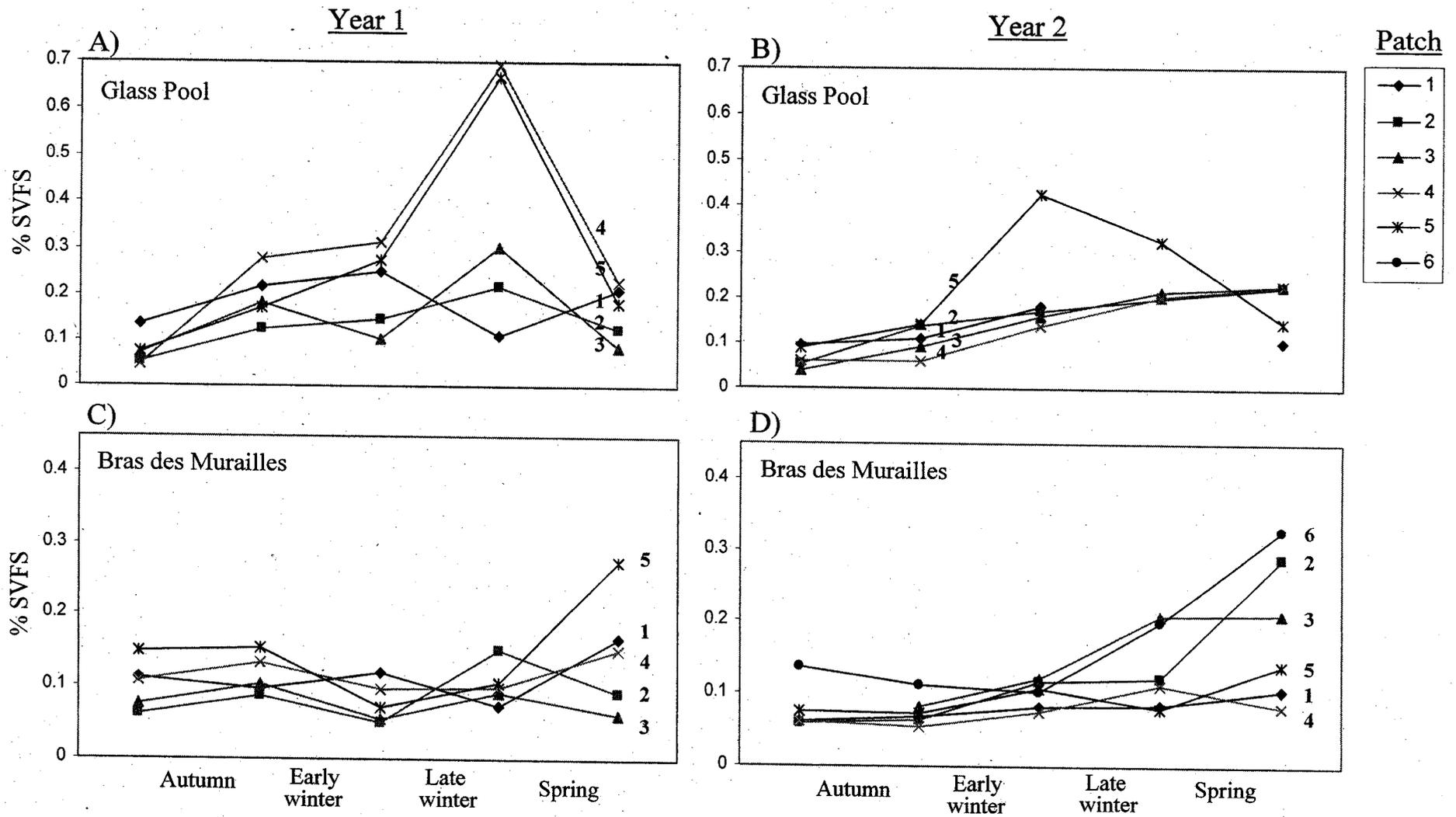


Figure 6.11: Temporal variation of SVFS content at each sampling period for both sites and sampling years. An increase corresponds to infiltration while a decrease corresponds to flushing of SVFS. Note that scales are different between sites.

## CHAPITRE 7

### **Démonstration de l'efficacité d'une nouvelle technique de nettoyage pour diminuer la quantité de sédiments fins dans le substrat des frayères de salmonidés**

Levasseur, Mylène, Bérubé, Francis et Bergeron, Normand E.

INRS- Eau, Terre et Environnement

490 de la Couronne, Québec, Qc, G1K 9A9, Canada

Téléphone : (418) 654-2524

Fax : (418) 654-2600



## Résumé

L'infiltration excessive de sédiments fins dans le substrat de fraie de salmonidés devient de plus en plus un facteur important qui limite les succès de reproduction. Les gestionnaires de rivières cherchent une façon de remédier à ce problème. Plusieurs techniques de nettoyage du substrat ont été développées depuis les trente dernières années, mais la majorité d'entre elles sont complexes et coûteuses. De plus, l'usage d'une énergie supplémentaire et d'une importante main-d'œuvre est souvent nécessaire à leur fonctionnement. L'objectif de ce projet était de développer et de tester l'efficacité d'une nouvelle technique de nettoyage. Cette dernière utilise une combinaison de deux appareils, soit une base-griffée qui permet de démobiliser le substrat et un traîneau-défecteur qui utilise la force de l'écoulement pour déloger les sédiments fins du substrat de fraie. Des essais de nettoyage ont été effectués sur deux sites de la rivière Ste-Marguerite (Saguenay, Québec). Des échantillons du substrat ont été récoltés dans une zone témoin et une autre nettoyée sur les deux sites, afin de déterminer l'efficacité de la technique à diminuer la quantité de sédiments fins présents dans le substrat. Une diminution du pourcentage de toutes les fractions de sédiments fins (sable grossier, moyen, fin et les silts) entre la zone témoin et celle nettoyée a été observée sur les deux sites, ainsi que l'amélioration des valeurs d'indices de la qualité des frayères (Sand index (SI), Fredel index (FI) et %<2mm). L'effet positif du nettoyage observé autant par les pourcentages de sédiments fins que par les valeurs d'indices, n'est significatif ( $p < 0.05$ ) que sur un des deux sites. Cette dissemblance s'explique par la différence des conditions hydrauliques mesurées sur les deux sites au moment du nettoyage. Il serait important d'effectuer une série de tests afin de déterminer les limites d'applicabilité et d'efficacité de cette nouvelle technique qui est prometteuse, en ce qu'elle est simple, peu coûteuse et facile à utiliser.

## Introduction

Il est depuis longtemps établi que le faible succès de reproduction des salmonidés en rivière est en partie relié à l'augmentation de la quantité de sédiments fins qui se déposent ou s'infiltrent dans le substrat de fraie (Carling et McCahon, 1987; Chapman, 1988; Wood et Armitage, 1997; Kondolf, 2000). La distribution granulométrique typique d'une rivière à salmonidés est bimodale (Carling et McCahon, 1987), car les interstices créés par les vides entre les particules grossières du lit sont partiellement remplis de sédiments plus fins. Il a été démontré que certaines activités anthropiques peuvent modifier cette distribution typique, entre autres, par l'apport excessif de grandes quantités de particules fines dans les rivières. Par exemple, la présence d'un ouvrage hydroélectrique a pour effet de régulariser le débit du cours d'eau, ce qui cause en aval du barrage une réduction de la capacité de transport de l'écoulement favorisant ainsi la sédimentation de particules fines sur le substrat (Kondolf *et al.*, 1987; Petts *et al.*, 1989). L'agriculture (Richards *et al.*, 1993), les mines (Davies-Colley *et al.*, 1992), les opérations forestières (Scrivener et Brownlee, 1989; Clarke *et al.*, 1998, St-Onge *et al.*, 2001) et la construction de routes (Boon, 1988; Marchant, 1989; Clarke *et al.*, 1998) contribuent aussi au déséquilibre des cours d'eau et favorisent l'infiltration de sédiments fins dans le substrat (Wood et Armitage, 1997). Les sédiments fins nuisent au développement des embryons car ils obstruent les interstices du substrat, ayant pour conséquence de réduire l'écoulement intergranulaire (Everest *et al.*, 1987; Argent et Flebbe, 1999) responsable de l'oxygénation des oeufs et des alevins ainsi que de l'expulsion des déchets métaboliques en dehors du nid lors de la période d'incubation (Crisp, 1993). De plus, les sédiments fins nuisent aussi parfois à l'émergence des alevins vers la surface car ils bloquent le déplacement de ceux-ci dans le substrat (Beschta et Jackson, 1979; Chapman, 1988).

Depuis les trente dernières années, plusieurs chercheurs et gestionnaires de rivières ont développé et utilisé différents types d'appareils pour nettoyer le substrat des frayères de salmonidés pour en augmenter la qualité, plus particulièrement en diminuant les quantités de sédiments fins. La littérature fait état d'une multitude de techniques de nettoyage qu'il est possible de regrouper en deux types d'approches générales. La première approche

consiste à utiliser un appareil ou un outil qui permet de démobliser le lit du cours d'eau en remuant le substrat afin de déloger une partie des sédiments fins présents. Ces derniers sont par la suite récupérés ou transportés par l'écoulement en aval du site nettoyé. La scarification à l'aide d'un râteau ou d'une fourche fixée à un tracteur (Acornley et Sear, 1999; Shackle *et al.*, 1999) et l'injection à pression d'air et/ou d'eau dans le substrat (Shields, 1968; Andrew, 1974; Mih, 1978; Mih et Bailey, 1981; Acornley et Sear, 1999; Shackle *et al.*, 1999) font partie de ce type d'approche. La deuxième approche consiste à utiliser une structure ou un aménagement situé sur le site à nettoyer ou en amont de celui-ci, dans l'optique de déloger et de transporter les sédiments fins hors du site à l'aide des caractéristiques de l'écoulement (i.e. vitesse et intensité turbulente). Les relâchées d'eau contrôlées à l'aide d'un barrage (i.e. flushing flows) (Kondolf *et al.*, 1987; Kondolf et Wilcock, 1996), les déflecteurs-barrière (baffle-gate) (Mih, 1978), les trappes à sédiments (Hansen *et al.*, 1982; Hermansen et Krog, 1985; Ylkanen, 1993; Avery, 1996) et les seuils et déflecteurs (White, 1942; Everest *et al.*, 1989; Fusilier et Edds, 1995; Rubin *et al.*, 2004) sont quelques exemples de ce type d'approche pour nettoyer le substrat.

La majorité de ces techniques sont généralement coûteuses et complexes. Il n'est pas rare que la construction des aménagements et/ou le fonctionnement des appareils nécessite une importante main-d'œuvre et l'utilisation d'une énergie supplémentaire (e.g. batterie marine, génératrice). La littérature fait aussi état de plusieurs projets de nettoyage de frayères qui ont échoué (e.g. voir Hermansen et Krog, 1985; Frissell et Nawa, 1992; Kondolf *et al.*, 1996; Shackle *et al.*, 1999), soit à cause d'un manque de suivi et/ou d'entretien des sites et structures, mais surtout dû à un manque de compréhension des processus géomorphologiques et hydrauliques des rivières concernées. Malgré les effets nocifs connus des sédiments fins sur la production de salmonidés, très peu de travail a été effectué dans le but de déterminer l'efficacité des différentes techniques (Shackle *et al.*, 1999) et très peu de techniques simples et efficaces sont actuellement disponibles.

L'objectif principal de ce projet consiste à développer et à tester l'efficacité d'une nouvelle technique de nettoyage qui permet d'évacuer et de récupérer les sédiments fins du substrat de fraie afin d'en assurer la qualité pour la reproduction de salmonidés. Le but est de concevoir une technique simple qui utilise l'énergie hydraulique de la rivière pour fonctionner, sans nécessiter de relâchées d'eau. Il est aussi préférable que la technique soit facile à utiliser ou à construire afin que le coût soit abordable pour les éventuels utilisateurs, à savoir les gestionnaires de rivière. L'ensemble de ces conditions concernant la conception d'une nouvelle technique de nettoyage efficace permettrait d'atteindre un objectif à plus long terme qui consiste à rehausser la qualité de l'habitat physique de fraie des salmonidés pour éventuellement en augmenter les populations.

## **Méthodologie**

### **Description de la technique de nettoyage**

La nouvelle technique consiste en une combinaison d'une technique de scarification et d'une technique hydromotrice utilisant la force de l'écoulement pour déloger les sédiments fins du substrat de fraie. L'appareillage a été développé par l'INRS (Bérubé *et al.*, 2003) dans le cadre d'un programme du volet environnement du fond des priorités gouvernementales en sciences, technologies et environnement (FPGST-E).

Le premier appareil, la base-griffée, est constitué de trois herses de métal de 30 cm de long qui sont fixées à une base prolongée par un manche (figure 7.1A). Sur un site potentiel de fraie de faible qualité, le déplacement de cet appareil de l'aval vers l'amont, effectué à l'aide d'un treuil manuel, permet aux herses de démobiliser le substrat afin de briser l'armurage souvent présent à la surface du lit et, de ce fait, faciliter le travail du second appareil de nettoyage (i.e. le traîneau-défecteur). La profondeur à laquelle les herses s'insèrent dans le substrat est déterminée par l'opérateur.

Le second appareil, le traîneau-défecteur (figure 7.1B), est constitué d'une structure métallique (150 cm x 90 cm x 40 cm) dont la base forme deux patins (150 cm x 5 cm) permettant de faire glisser le traîneau sur la surface du lit de la rivière. Un déflecteur de courant (75 cm x 75 cm) est fixé à la structure métallique, dont la base est située à 10 cm au-dessus du lit afin de permettre un dégagement suffisant pour les plus gros galets lors du déplacement du traîneau. La fonction du déflecteur est de dévier et de concentrer une partie de l'écoulement vers le lit afin de déloger et soulever les sédiments fins présents dans le substrat de fraie. Une bavette de caoutchouc fixée à la base du déflecteur permet d'augmenter la vitesse de l'écoulement et l'intensité turbulente à la surface du lit afin d'en augmenter l'effet. L'angle du déflecteur est ajustable et peut être fixé par l'opérateur entre 10 et 90 degrés tout dépendant des conditions d'écoulement<sup>4</sup>. Un bac de récupération installé derrière la base du déflecteur permet de récolter les sédiments fins délogés du substrat et mis en transport. Une bande métallique anti-retour est placée à l'entrée du bac pour éviter que les sédiments fins trappés se redéposent sur le lit. Des parois grillagées ont été installés à l'arrière du bac pour faciliter l'écoulement derrière le traîneau-défecteur et aussi éviter une trop grande turbulence à l'intérieur du bac.

Pour nettoyer une zone du lit d'un cours d'eau, l'intervention de nettoyage s'effectue en deux temps, à savoir le passage de la base-griffée suivi du passage du traîneau-défecteur. Le substrat ayant été démobilisé par l'effet de la base-griffée, le déflecteur déloge alors efficacement les sédiments fins présents dans le substrat de fraie. Les sédiments très fins sont transportés par l'écoulement sur de longues distances en aval du site, tandis que les particules plus grossières se déposent dans le bac de récupération et sont ensuite expulsées du système. Tout dépendant de la dimension du site à nettoyer et de l'état du substrat, il est possible 1) d'effectuer plusieurs passages de l'appareil sur des zones parallèles afin de couvrir une grande superficie du site à nettoyer et 2) d'effectuer plusieurs passages des deux appareils sur la même zone afin d'optimiser l'effet du nettoyage lorsque le pavement est très difficile à démobiliser et/ou que le substrat est caractérisé par la présence de très grandes quantités de sédiments fins.

---

4 L'annexe 1 présente les résultats de travaux menés en laboratoire afin de tester l'effet du déflecteur sur les caractéristiques de l'écoulement.

### **Description des sites d'essais et du plan d'échantillonnage**

Dans le but de valider l'efficacité de la nouvelle technique, des essais de nettoyage ont été effectués en juillet 2004 sur deux sites potentiels de fraie de la rivière Ste-Marguerite (Saguenay, Québec). Afin de comparer l'efficacité de la méthode dans diverses conditions, les deux sites ont été choisis en fonction de leurs caractéristiques physiques distinctes. Le site A (tableau 7.1) est caractérisé par un substrat légèrement plus petit que celui du site B (D50 respectifs de 12.6 mm et 16.2 mm). De plus, sur le site A, la vitesse et la profondeur moyenne d'écoulement sont plus importantes que sur le site B (tableau 7.1). Un vélocimètre mécanique de type Price a été utilisé pour mesurer la vitesse à une hauteur de 40 % de la profondeur totale d'eau, sur une période de soixante secondes.

Afin de déterminer la composition granulométrique du substrat avant le nettoyage, dix échantillons du substrat ont été récoltés sur chacun des sites à l'aide d'un échantillonneur McNeil dans une parcelle longitudinale d'environ 1 m de large par environ 10 m de long (figure 7.2). L'appareil permettait de récolter des échantillons de substrat d'environ 8 à 10 kg, à des profondeurs d'environ 0.25 m. Une distance d'environ 0.7 m séparait chacun des échantillons de substrat (figure 7.2). Sur une parcelle adjacente de mêmes dimensions, le nettoyage a ensuite été effectué. Sur les deux sites, deux passages consécutifs de la base-griffée ont été nécessaires afin de bien ameublir le lit de la rivière. Par contre, un seul passage du traîneau-défecteur a ensuite été effectué. Sur les deux sites, l'angle du déflecteur était fixé à 75 degrés. À l'intérieur de la parcelle nettoyée de chacun des sites, dix autres échantillons de substrat ont été prélevés vis-à-vis les échantillons de la zone témoin (figure 7.2). La distance moyenne séparant les échantillons des zones témoins et des zones nettoyées était d'environ 0.4 m. Étant donné qu'il est impossible d'échantillonner le substrat au même endroit pour comparer l'état d'avant et d'après le nettoyage, les échantillons d'un même couple étaient assez rapprochés dans l'espace pour être considérés comme appartenant à la même population.

Les sédiments récoltés ont ensuite été séchés et tamisés en laboratoire à des intervalles standard variant de 0.063 à 8 mm afin de déterminer le contenu des différentes classes de sédiments fins de chaque échantillon. Quatre classes de sédiments fins ont été analysées, soit les sables grossiers (0.5 à 2 mm), les sables moyens (0.25 à 0.5 mm), les sables fins (0.063 à 0.25 mm) et les silts (< 0.063 mm). Trois indices, qui sont largement utilisés dans la littérature pour estimer les succès de reproduction de salmonidés, ont aussi été calculés. L'indice de pourcentage de sédiments < 2mm (%<2mm), correspond à la somme des pourcentages de sédiments fins < 2mm contenu dans un échantillon de substrat (Peterson, 1978). Plus la valeur de l'indice augmente, plus la perméabilité du substrat diminue et plus les taux de survie risquent d'être faibles. La valeur de l'indice doit être inférieure à 20 % pour être associée à une bonne perméabilité. À partir des teneurs d'un échantillon en sable grossier ( $S_g =$  de 0.5 à 2.2 mm) et en sable fin ( $S_f =$  de 0.06 à 0.5 mm), l'indice de sable (SI) est calculée par une somme pondérée des deux fractions ( $SI = (S_g / 16) + (S_f / 8)$ ) (Peterson et Metcalfe, 1981). Une valeur de cet indice inférieure à 1 correspond à un bon succès de survie. Le calcul de l'indice de Fredle (FI) utilise la moyenne géométrique ( $D_g = (D_{16} * D_{84})^{0.5}$ ) et l'indice d'arrangement ( $S_o = (D_{75} / D_{25})^{0.5}$ ) et se définit comme le ratio de  $D_g$  sur  $S_o$  (Lotspeich et Everest, 1981). Une valeur supérieure à 5 de cet indice correspond à une probabilité de survie excellente.

Le test de Wilcoxon a été utilisé pour comparer les couples d'échantillons du substrat récoltés sur chacun des sites dans la zone témoin et la zone ayant été nettoyée à l'aide de la nouvelle technique. Le test a été effectué pour chacune des quatre classes de sédiments fins et pour chacun des trois indices calculés.

## Résultats

L'analyse granulométrique des échantillons récoltés sur les deux sites avant le nettoyage, indique que le pourcentage de sédiments fins de chacune des classes analysées est plus

élevés et plus variable sur le site A que le site B, indiquant ainsi un substrat de moindre qualité (tableau 7.2). Les valeurs des indices calculés indiquent aussi que le substrat est de moins bonne qualité sur le site A.

L'utilisation de la nouvelle technique de nettoyage a permis de réduire le pourcentage de sédiments fins de toutes les classes sur les deux sites (tableau 7.2). L'effet positif du nettoyage est aussi démontré par l'amélioration des valeurs d'indices de qualité des frayères, soit une diminution du SI et du pourcentage de <2 mm et une augmentation de FI (tableau 7.2) sur les deux sites. Suite au passage de l'appareil, 6.7 kg de sédiments fins ont été récupérés à l'intérieur du bac du traîneau-défecteur sur le site A et environ 200 g sur le site B. En observant les valeurs de % de nettoyage, on remarque aussi que ces dernières sont plus fortes pour le site A que pour le site B (tableau 7.2). L'effet positif du nettoyage observé autant par les pourcentages de sédiments fins que par les valeurs d'indice, n'est significatif que sur le site A (tableau 7.2).

En observant plus spécifiquement les résultats du tableau 7.2, on remarque, entre autres, que la nouvelle technique est plus efficace pour diminuer la quantité de certaines classes de sédiments fins présents dans le substrat des frayères. La technique semble légèrement plus efficace pour les silts et les sables grossiers que pour les sables fins et moyens sur le site A. Pour le site B, on remarque que le pourcentage de nettoyage semble augmenter avec une diminution de la taille des sédiments fins.

La figure 7.3 permet d'analyser plus en détails l'effet de nettoyage de la nouvelle technique, en illustrant la relation entre le pourcentage de chacune des classes de sédiments fins pour chaque couple d'échantillons récupérés dans les zones témoins et nettoyées sur les deux sites d'étude. La figure 7.3A montre que la nouvelle technique de nettoyage a permis de diminuer les quantités de sédiments fins présents dans le substrat de fraie du site A, puisque la majorité des points des quatre classes de sédiments fins analysées sont localisés en-dessous de la droite 1 :1. Étant donné que les relations sont positives et significatives (figure 7.3A), cela démontre que le nettoyage diminue de façon relative le pourcentage de sédiments fins présents dans le substrat en fonction du

pourcentage initial, mais ne le réduit pas à une valeur absolue. Par ailleurs, la pente des relations est très faible pour les silts et les sables grossiers (figure 7.3A), ce qui indique que plus le substrat contient au départ une grande quantité de ces deux classes de sédiments, plus la technique de nettoyage est efficace pour en diminuer la quantité totale contenue dans le substrat de fraie.

La figure 7.3B montre, tout comme le tableau 7.2, que les résultats obtenus pour le site B sont différents de ceux observés sur le site A. Bien que la majorité des points soient au-dessous de la ligne 1 :1, quelques autres sont localisés sur ou au-dessus de cette droite. Même si les relations entre les pourcentages de chaque classe de sédiments fins entre la zone nettoyée et la zone témoin sont positives, elles ne sont pas significatives. Il est possible de conclure que sur ce site, l'appareil de nettoyage n'a pas permis d'améliorer efficacement la qualité du substrat pour plusieurs des couples d'échantillons. À l'opposé, pour quelques paires d'échantillons, l'appareil a plutôt laissé le substrat dans l'état tel qu'il était avant le nettoyage et a parfois même contribué à une détérioration de la qualité de ce dernier.

## **Discussion**

Les résultats indiquent un effet généralement positif de l'application de la nouvelle technique de nettoyage sur la réduction du pourcentage des différentes classes de sédiments fins sur les deux sites d'étude. La technique s'est avérée très efficace sur le site A, puisque les résultats ont permis de constater une réduction significative du contenu de toutes les classes de sédiments fins dans le substrat, ceci est aussi démontré par la quantité non négligeable de sédiments fins recueillis dans le bac suite au passage du traîneau-défecteur. La technique s'est cependant avérée moins efficace sur le site B, car bien que la tendance générale soit à la diminution du contenu en sédiments fins dans le substrat de fraie, il a été démontré que ces réductions ne sont pas significatives. De plus, dans certains cas, l'utilisation de la nouvelle technique a même détérioré la qualité du site B en augmentant la teneur en sédiments fins dans le substrat.

La dissemblance dans l'efficacité du nettoyage sur les sites A et B s'explique par la différence des conditions hydrauliques mesurées sur les deux sites au moment du nettoyage. Sur le site A, la vitesse de l'écoulement était suffisamment grande pour déloger et soulever les sédiments fins enfouis dans le substrat démobilisé du lit, de façon 1) à en expédier une certaine quantité dans le bac de récupération et 2) à en expulser d'autres par le transport en suspension en dehors de la zone nettoyée. Ceci explique possiblement pourquoi le nettoyage sur le site A est plus efficace pour les silts, car ces derniers sont facilement transportés en suspension sur de longues distances, ainsi que pour les sables grossiers qui sont directement déposés dans le bac étant donné leur poids beaucoup plus important. Les sables fins et les sables moyens sont probablement transportés en suspension, mais sur de plus courtes distances que les silts. Une certaine quantité de sables fin et moyen tombent dans le bac, tandis que d'autres sont entraînés par-dessus le bac et se déposent à nouveau rapidement sur le substrat derrière le traîneau-défecteur. Ceci expliquerait pourquoi le pourcentage de nettoyage de ces deux classes de sédiments fins est moins élevé que ceux du pourcentage de silt et de sable grossier. La situation est très différente sur le site B, car la vitesse de l'écoulement était trop faible pour assurer l'efficacité du déflecteur. Cette faible vitesse n'a pas permis de déloger les sédiments fins du substrat et plus spécifiquement les particules grossières. Les résultats montrent une relation négative entre l'efficacité du nettoyage et la taille des sédiments fins. Le nettoyage est optimal pour diminuer la quantité de silt dans le substrat, mais plus la taille des sédiments fins est grande, plus l'appareil perd de son efficacité. Étant donné que les particules les plus fines (e.g. silts) sont plus faciles à déloger du substrat et à transporter en suspension, il est envisageable que ceci explique une plus grande efficacité de l'appareil de nettoyage pour les classes les plus fines, malgré la faible compétence de l'écoulement sur le site B.

En ce qui a trait à la détérioration de la qualité du substrat suite au nettoyage observé dans quelques cas sur le site B, il est plausible que le passage de la base-griffée ait permis, en démobilisant le substrat, de remonter une certaine quantité de sédiments fins du sous-pavement vers la surface. Il est connu que le sous-pavement est caractérisé par une

quantité supérieure de sédiments fins comparativement au pavement (Frostick *et al.*, 1984; Kondolf, 2000). Pour cette raison, si les conditions d'écoulement ne sont pas assez fortes lors du passage du déflecteur pour déloger les sédiments fins hors du substrat qui a été démobilité par la base-griffée, il est compréhensible que le nouvel échantillon du mélange de pavement et sous-pavement soit parfois caractérisé par une quantité plus élevée de sédiments fins que le substrat d'avant nettoyage. Étant donné que le traîneau-déflecteur utilise la force hydromotrice de l'écoulement pour déloger les sédiments fins présents dans les interstices du substrat, il est normal que l'appareil perde de son efficacité pour certaines conditions d'écoulement limitantes.

## **Conclusion**

La nouvelle technique de nettoyage du substrat présentée dans cet article est prometteuse en ce qu'elle est simple, relativement compacte, peu coûteuse et facile à utiliser. De grandes superficies de frayère peuvent être nettoyées assez rapidement et sans avoir recours à une source d'énergie supplémentaire pour fonctionner. Seules deux personnes sont nécessaires pour assurer le bon fonctionnement de l'appareil. Toutefois, afin de garantir l'efficacité du traîneau-déflecteur, les conditions hydrauliques sur le site à nettoyer doivent être adéquates. Il est donc envisageable d'utiliser cette nouvelle technique dans le but d'améliorer la qualité du substrat de fraie de plusieurs rivières à saumon présentement caractérisées par des sites de fraie sursaturés en quantité de sédiments fins.

Étant donné que les résultats de cette étude ont démontré que les conditions d'écoulements peuvent être limitantes, il serait nécessaire dans un avenir rapproché, d'effectuer une série de tests de nettoyage en milieu naturel dans une plus grande gamme de conditions hydrauliques et granulométriques afin de déterminer les limites d'applicabilité et d'efficacité de cette nouvelle technique de nettoyage. Il serait aussi

intéressant d'expérimenter l'efficacité à long terme du nettoyage à l'aide de cette technique, en échantillonnant par exemple le substrat dans une zone nettoyée immédiatement avant la fraie et ensuite à la fin de la période d'incubation. Des tests d'incubation d'œufs fertilisés déposés dans le substrat de zones témoins et de zones nettoyées, permettraient d'analyser directement l'effet du nettoyage sur la survie des embryons de salmonidés.

## **Remerciements**

Les auteurs tiennent à remercier leurs partenaires financiers : Les Fonds des Priorités Gouvernementales en Sciences et en Technologie (FPGST-E), le Centre Interuniversitaire de Recherche sur le Saumon Atlantique (Cirsas), l'Association de la rivière Ste-Marguerite et le Conseil de la Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) pour avoir accordé à Normand Bergeron une subvention pour l'aide à la recherche ainsi qu'une bourse d'étude attribuée à Mylène Levasseur. Merci particulier à Julie Smith et Giselle Wagner pour l'assistance technique ainsi qu'à Georges Blanchet et Patricia Johnston, pour leurs commentaires lors de la révision de versions antérieures du manuscrit.

## 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): 447-458.
- Andrew, F.J. (1974). A technique for cleaning spawning gravel. *Inter. Paci. Salmon Fish. Comm.* : 195-200.
- Argent, D.G. et Flebbe, P.A. (1999). Fine sediment effects on brook trout eggs in laboratory streams. *Fisheries Research* (39) : 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) : 282-293.
- Bérubé, F., Levasseur, M., Bergeron, N. et Pouliot, M-A. (2003). Développement et démonstration de techniques pour la restauration de la qualité du substrat de fraie des salmonidés. Rapport final de l'INRS Eau, Terre et environnement, Québec. 84 pages.
- Beschta, R.L. et Jackson, W.L. (1979). The intrusion of fine sediments into a stable gravel bed. *Journal of the Fisheries Resource Board of Canada* (36) : 204-210.
- Boon, P.J. (1988). The impact of river regulation on invertebrate communities in the U.K. *Regulated Rivers: Research and Management* (2) : 389-409.
- Carling, P.A. et McCahon, C.P. (1987). Natural siltation of brown trout (*Salmo trutta L.*) spawning gravels during low-flow conditions. Dans : Craig, J.F. et Kemper, J.B. (eds.) *Regulated streams: Advances in ecology*. Plenum Press, New York. pp. 229-244.
- 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 : 1-21.

- Clarke, K.D., Scruton, D.A. et McCarthy, J.H. (1998). The effect of logging and road construction on fine sediment accumulation in streams of the Copper Lake watershed, Newfoundland, Canada: initial observations. Dans : *Forest-fish conference: land management practices affecting aquatic ecosystems*. Proceedings of the Forest-Fish Conf., 1-4 mai 1996, Calgary, Alberta. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, North. For. Cent. (Edmonton, Alberta). Inf. Rep. NOR-X-356. pp. 353-360.
- Crisp, D.T. (1993). The ability of U.K. salmonid alevins to emerge through a sand layer. *Journal of Fish Biology* (43) : 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* (248) : 215-234.
- Everest, F.L., Beschta, R.L., Scrivener, J.C., Koski, K.V., Sedell, J.R. et Cederholm, C.J. (1987). Fine sediment and salmonid production : a paradox. Dans : Salo, E.O. et Cundy, T.W. (eds.) *Streamside management: forestry and fishery interactions*. University of Washington, College of forest resources, Cont. No. 57. Seattle. pp. 98-142.
- Everest, F.H., Reeves, G.H. et Sedell, J.R. (1989). Salmonid habitat: new beginnings through enhancement, but not without uncertainty, risk and failure. Proceedings of *Wild Trout, Steelhead and Salmon in the 21<sup>st</sup> Century*, Portland, Oregon. 19 juillet 1986. pp. 9-19.
- 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) : 182-197.
- Frostick, L.E., Lucas, P.M. et Reid, I. (1984). The infiltration of fine matrices into coarse grained alluvial sediment and its implications for stratigraphical interpretation. *Journal of the Geological Society of London* (14) : 955-965.
- Fusilier, L. et Edds, D. (1995). An artificial riffle restored habitat for the threatened Neosho Madtom. *North American Journal of Fisheries Management* (15) : 499-503.
- Hansen, E.A., 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.

- 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. Dans : Alabaster, J.S. (ed.) *Habitat Modification and Freshwater Fisheries*. EIFAC Proceedings, FAO, Butterworths, London-Boston : 116-123.
- Kondolf, M. (2000). Assessing salmonid spawning gravel quality. *Transactions of the American Fisheries Society* (129) : 262-281.
- Kondolf, G.M., 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 : 927-935.
- Kondolf, G.M. et Wilcock, P.R. (1996). The flushing flow problem: defining and evaluating objectives. *Water Resources Research* (32), no. 8 : 2589-2599.
- 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* (125), no. 6 : 899-912.
- Lotspeich, F.B. et Everest, F.H. (1981). A new method for reporting and interpreting textural composition of spawning gravel. Research note PNW-369. U.S. Forest and Range Service Pacific Northwest Experiment Station. 12 pages.
- Marchant, R. (1989). Changes in the benthic invertebrate communities of the Thomson River, Southeastern Australia, after dam construction. *Regulated Rivers: Research and Management* (4) : 71-89.
- Mih, W.C. (1978). A review of restoration of stream gravel for spawning and rearing of salmon species. *Fisheries* (3), no. 1 : 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 : 16-20.
- Petts, G.E., Thoms, M.C., Brittan, K. et Atkin, B. (1989). A freeze-coring technique applied to pollution by fine sediments in gravel-bed rivers. *The Sciences of the total Environment* (84) : 259-272.

- Peterson, R.H. (1978). Physical characteristics of Atlantic salmon spawning gravels in some New Brunswick streams. Fisheries and Oceans Canada, biological station, *Fisheries and marine service technical report* (785), St-Andrews, New Brunswick.
- Peterson, R.H. et Metcalfe, J.L. (1981). Emergence of Atlantic salmon fry from gravels of varying composition: a laboratory study. *Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences* (1020). 28 pages.
- Richards, C., Host, G.H. et Arthur, J.W. (1993). Identification of predominant environmental factors structuring stream macroinvertebrate communities within a large agricultural catchment. *Freshwater Biology* (29) : 285-294.
- Rubin, J.-F., Glimsäter, C. et Jarvi, T. (2004). Characteristics and rehabilitation of the spawning habitats of the sea trout, *Salmo trutta*, in Gotland (Sweden). *Fisheries Management and Ecology* (11) : 15-22.
- Scrivener, J.C. et Brownlee, M.J. (1989). Effects of forest harvesting on spawning gravel and incubation survival of chum (*Oncorhynchus keta*) and coho salmon (*O. kisutch*) in Carnation Creek, British Columbia. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (46) : 681-696.
- 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) : 477-486.
- Shields, H.J. (1968). Riffle sifter for Alaska salmon gold. *Yearbook of Agriculture*. Separate No. 3586. pp. 204-208.
- St-Onge, I., Bérubé, P. et Magnan, P. (2001). Effets des perturbations naturelles et anthropiques sur les milieux aquatiques et les communautés de poissons de la forêt boréale. *Nat. Can.* (125) : 81-95.
- White, H.C. (1942). Atlantic salmon redds and artificial spawning beds. *Journal of the Fisheries Resource Board of Canada* (6), no. 1. pp. 37-44.
- Wood, P.J. et Armitage, P.D. (1997). Biological effects of fine sediment in the lotic environment. *Environmental Management* (21), no. 2 : 203-217.
- 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.

Tableau 7.1 Caractéristiques générales des frayères à l'étude sur la branche principale de la rivière Ste-Marguerite (Saguenay, Québec), exprimées en moyenne (écart-type).

	Site A	Site B	n
D50 (mm)*	12.6 (5.6)	16.2 (3.7)	10
Vitesse (cm/s)	35.0 (3.1)	16.4 (3.0)	10
Profondeur (cm)	46.9 (2.6)	32.6 (2.2)	10

\* Calculé à partir des échantillons du substrat récoltés dans les zones témoins.

Tableau 7.2 Moyenne (écart-type) des différentes classes de sédiments fins (sable grossier, moyen, fin et silt) et des indices (FI, SI et %<2 mm) pour les zones témoins et les zones nettoyées des deux sites et impact du nouvel appareil exprimé en % de nettoyage.

	Site A				Site B				
	Zone témoin	Zone nettoyée	Nettoyage * (%)	n	Zone témoin	Zone nettoyée	Nettoyage * (%)	n	
Sable grossier (%)	17.5 (13.9)	8.6 (1.2)	**	50.9	10	15.3 (2.5)	14.2 (2.9)	7.2	10
Sable moyen (%)	9.1 (2.6)	6.4 (2.0)	**	29.7	10	7.7 (1.3)	6.8 (1.6)	11.7	10
Sable fin (%)	1.9 (0.7)	1.3 (0.5)	**	31.6	10	1.5 (0.5)	1.2 (0.4)	20.0	10
Silt (%)	0.054 (0.05)	0.03 (0.01)**		44.4	10	0.042 (0.04)	0.026 (0.01)	38.1	10
Sand index (SI)	3.7 (1.9)	2.0 (0.4)	**	46.0	10	3.0 (0.4)	2.7 (0.5)	10.0	10
< 2mm (%)	28.5 (15.4)	16.4 (3.4)	**	42.5	10	24.4 (3.3)	22.2 (4.5)	8.3	10
Fredle (FI)	1.8 (1.1)	3.2 (1.8)	**	-77.8	10	1.7 (0.5)	2.2 (2.0)	-29.4	10

\* Nettoyage (%) = ((Zone témoin – Zone Nettoyée)/ Zone témoin)\*100.

\*\* Valeurs significativement différentes entre les zones témoins et nettoyées (Test de Wilcoxon, p< 0.05).

A)



B)



Figure 7.1 A) Photos de la base-griffée utilisée pour démobiliser le substrat  
B) Photo du traîneau-défecteur.

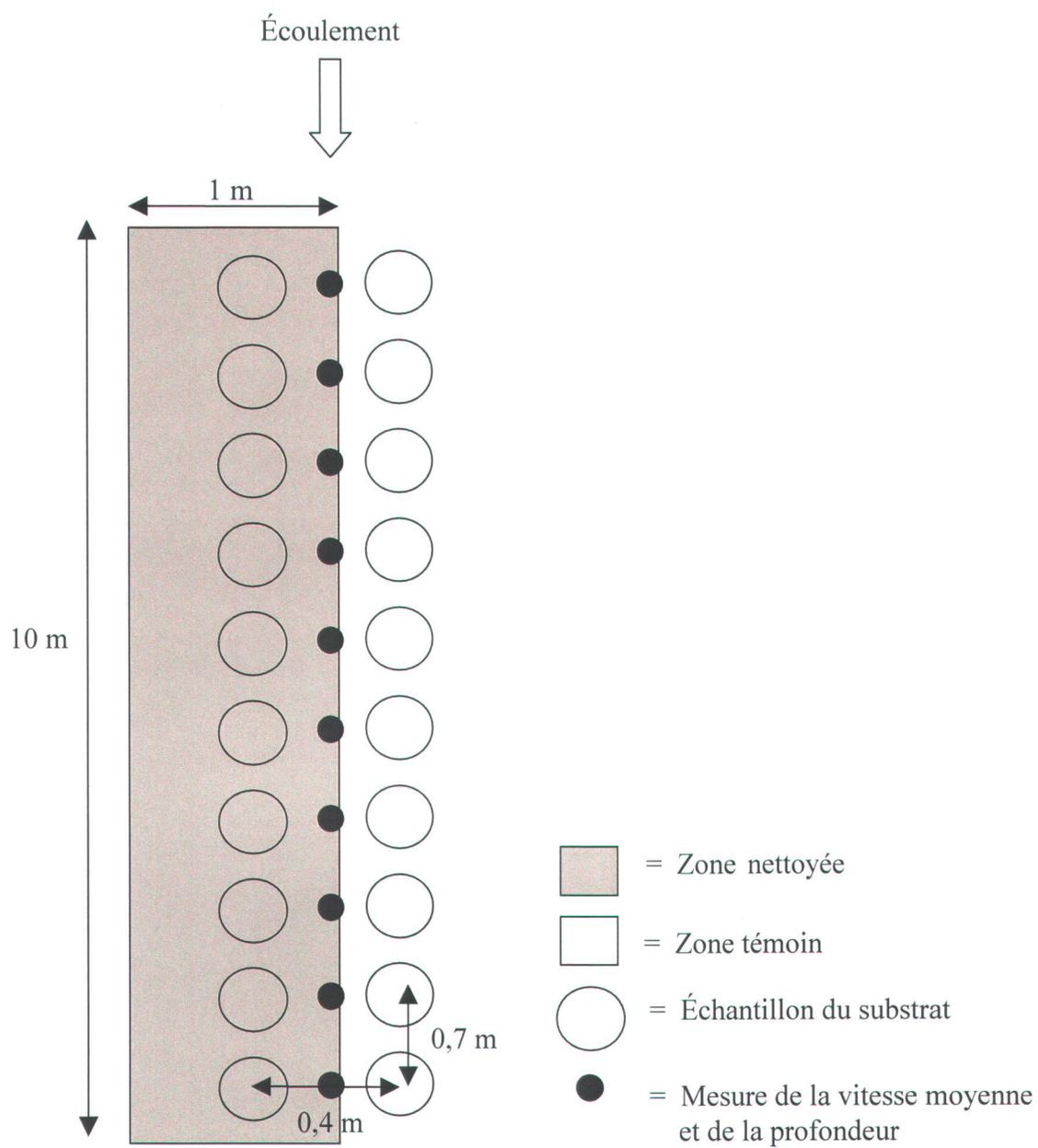
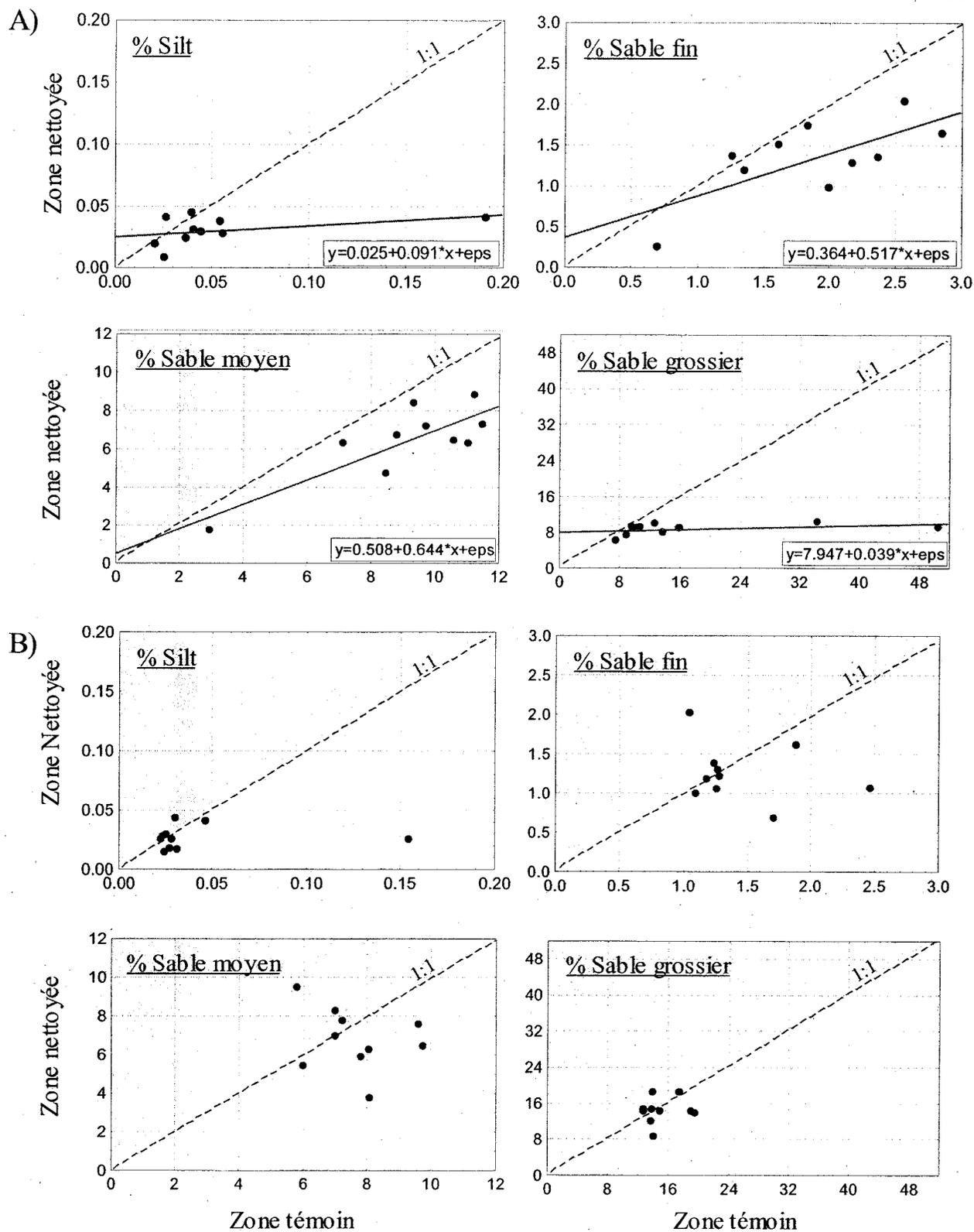


Figure 7.2 Plan d'échantillonnage sur un site d'étude.





## CHAPITRE 8

### **Évaluation de l'importance relative du gradient hydraulique et des caractéristiques du substrat sur la vitesse de l'écoulement intergranulaire en milieu naturel**

---

#### **8.1 Contexte**

La détermination de la qualité d'une frayère pour la reproduction des salmonidés se fait généralement par la caractérisation du substrat (e.g. D50, teneur en sédiments fins, porosité, conductivité hydraulique, indice de Peterson, indice de Fredde, etc. (voir la section 1.1.4, chapitre 1, pour une description détaillée)). Cette approche vise à déterminer de façon indirecte les caractéristiques de l'écoulement intergranulaire qui assure les apports en oxygène nécessaires au développement des embryons lors de la période d'incubation. Il serait ainsi plus précis de mesurer la vitesse de l'écoulement intergranulaire, puisque comparativement à l'état du substrat cette variable est directement reliée à la survie des embryons.

Selon la loi de Darcy ( $V_i = -K * n * dh/dl$ , où  $K = k * g * \gamma / \mu$ ), la vitesse de l'écoulement intergranulaire ( $V_i$ ) est influencée en partie par l'état du substrat, via la perméabilité ( $k$ ) et la porosité ( $n$ ) de ce dernier, ainsi que par le gradient hydraulique ( $dh/dl$ ) lui-même contrôlé par la topographie du lit du cours d'eau. Ainsi, si la porosité diminue, par exemple suite à l'infiltration de sédiments fins dans les interstices du substrat, il en résultera une vitesse de l'écoulement intergranulaire plus faible. Une interrelation positive semblable s'applique aussi avec une variation du gradient hydraulique. Par exemple, une augmentation du niveau d'eau sur une frayère, provoquerait une diminution du gradient hydraulique et par le fait même, une diminution de la vitesse de l'écoulement intergranulaire (figure 8.1).

Plusieurs études ont été menées dans le but de mieux comprendre les interactions entre la vitesse de l'écoulement intergranulaire, le gradient hydraulique, la topographie du lit et les caractéristiques du substrat (ex. perméabilité, porosité, pourcentage de sédiments fins, etc.). La section 1.1.3 (chapitre 1) présente le détail de ces études, entre autre la

description des méthodes utilisées et des principaux résultats qui en découlent. Par ailleurs, la majorité de ces études ont été menées en laboratoire. De ce fait, les interactions entre la vitesse de l'écoulement intergranulaire et les différents facteurs pouvant la modifier sont très peu documentés en milieu naturel, spécifiquement au droit de frayères de salmonidés possédant des caractéristiques particulières.

Deux objectifs sont visés dans ce chapitre. Le premier objectif consiste à développer une méthode fiable en milieu contrôlé qui permettra d'estimer la vitesse intergranulaire en milieu naturel. Le second objectif consiste à déterminer l'importance relative du gradient hydraulique et des caractéristiques du substrat sur la vitesse de l'écoulement intergranulaire dans le substrat de frayères en milieu naturel.

## **8.2 Élaboration d'une méthode pour déterminer la vitesse de l'écoulement intergranulaire**

### **8.2.1 Introduction**

La littérature fait état de plusieurs méthodes différentes pour estimer la vitesse de l'écoulement intergranulaire. Mentionnons notamment l'utilisation de différents traceurs dans l'écoulement ainsi que les analyses de vitesse de dilution de colorant (se référer au chapitre 1, section 1.1.3 pour une description détaillée de ces méthodes). De l'ensemble de ces méthodes, selon Grost *et al.* (1988), celle du traçage est la plus propice à l'échantillonnage de la vitesse de l'écoulement intergranulaire. Cette méthode consiste à déterminer la vitesse de l'écoulement en calculant le temps écoulé lors du déplacement d'un traceur (ex. : sel, teinture, etc.) dans le substrat sur une distance déterminée. Les courbes résultantes de ces expériences de traçage ne sont pas caractérisées par une distribution normale. Les paramètres utilisés pour en extraire la valeur moyenne de la vitesse de l'écoulement intergranulaire varient d'une étude à l'autre. Ainsi, la valeur de la vitesse estimée est souvent très différente dépendant du paramètre choisi. Le mode de la distribution, qui correspond à la valeur maximale de concentration du traceur, est le

paramètre le plus fréquemment utilisé (Thibodeaux et Boyle, 1987; Grost *et al.*, 1988; Harvey et Bencala, 1993; Park *et al.*, 2004) afin de déterminer le temps qu'a pris le traceur pour se déplacer dans le substrat entre deux endroits précis.

L'objectif de cette section est d'élaborer une méthode qui permet de déterminer la vitesse intergranulaire de l'écoulement en milieu contrôlé dans le but de l'utiliser en milieu naturel. Il s'agit de développer une application terrain de l'approche par traçage pour déterminer la vitesse intergranulaire et ce, à partir du paramètre le plus adéquat (ex. : le mode de la distribution). Trois sous-objectifs doivent être atteints, soit :

- élaborer techniquement la méthode d'échantillonnage;
- valider cette nouvelle méthode en milieu contrôlé;
- utiliser les courbes résultantes de la variation de la concentration du traceur dans le temps pour déterminer si le mode est le meilleur paramètre pour déterminer la valeur réelle de la vitesse intergranulaire et si tel n'est pas le cas, quel est le ou les paramètres qui permettent de mieux l'estimer.

### **8.2.2 Méthodologie**

Des essais en chenal expérimental ont été effectués afin d'élaborer la technique d'échantillonnage. Les dimensions du chenal dans lequel ces essais ont été effectués étaient les suivantes : 1,8 m de longueur, 0,9 m de largeur et 0,6 m de profondeur (figure 8.2). Le chenal était subdivisé en trois compartiments. La partie centrale contenait du substrat (D50 de 22,3 mm) sur 0,3 m d'épaisseur qui provenait d'un site de fraie de la rivière Ste-Marguerite (Saguenay). Les deux autres compartiments, localisés à chaque extrémité du chenal, servaient de bac d'entrée et de sortie de l'eau qui s'écoule dans le substrat. Les conditions en milieu confiné étaient respectées, car les parois qui séparaient les deux compartiments de la partie centrale étaient troués et le niveau d'eau dans le bac central n'excédait pas le substrat. Étant donné que le substrat était le même pour toutes les expérimentations, la conductivité hydraulique ( $K$ ), la perméabilité ( $k$ ) et la porosité ( $n$ ) du

substrat étaient constants. Par contre, il était possible de faire varier le gradient hydraulique ( $dh/dl$ ). Notons que  $dh$  correspond à la différence de hauteur d'eau entre le bac d'entrée et de sortie et que  $dl$  est la longueur du chenal qui contient le gravier. Il était ainsi possible de générer différents gradients en variant la hauteur d'eau du bac de sortie, car l'apport en eau dans le bac d'entrée était constant. La différence de hauteur d'eau entre les deux bacs était déterminée avec précision par une lecture visuelle sur deux petits tuyaux, situés côte à côte, qui étaient alimentés par chacun des deux bacs (figure 8.3).

La vitesse intergranulaire réelle ( $V_{ir}$ ) était calculée à partir du débit intergranulaire ( $Q_i$ ). Elle se définit comme suit :

$$V_{ir} = Q_i / A_e$$

où le débit intergranulaire est le volume d'eau provenant du bac de sortie pour un temps déterminé. L'aire efficace ( $A_e$ ) du chenal expérimental se définit comme suit :

$$A_e = A_c * n$$

où  $A_c$  est l'aire occupée par le substrat dans le chenal et  $n$  est la porosité du substrat. La porosité du substrat correspond au volume de vide divisé par le volume total occupé par le substrat. Le volume de vide se détermine en saturant d'eau le substrat à sec. Le volume d'eau utilisé pour remplir les interstices correspond ainsi au volume de vide.

Le plan d'échantillonnage consistait à effectuer un essai de traçage de sel pour différents gradients hydrauliques. Une solution d'eau salée était utilisée comme traceur, car selon Grost *et al.* (1988) ce type de traceur est le plus fiable, puisqu'il permet une mesure objective de la concentration d'eau salée lors de l'échantillonnage. Afin d'effectuer les essais de traçage, un tuyau injecteur et un piézomètre étaient installés dans le substrat du chenal expérimental à une certaine distance l'un de l'autre (environ 40 cm) (figure 8.4).

La base du tuyau injecteur était caractérisée par de petits trous (2 mm de diamètre) sur 20 cm de longueur et celle du piézomètre, par de minces fentes (1 mm de largeur par 5 cm de longueur) sur 15 cm de longueur du tuyau. Une sonde de conductivité était introduite dans le piézomètre afin de mesurer la conductivité de l'eau intergranulaire qui s'écoulait au travers du piézomètre sur une certaine période de temps. Pour effectuer le traçage de sel, une quantité d'eau (environ 1 litre) saturée était introduite dans le tuyau injecteur et une lecture de la sonde de conductivité était effectuée toutes les dix secondes du début de l'injection jusqu'à ce que la conductivité revienne à la concentration initiale correspondant au début de l'échantillonnage.

Un traçage de sel a été effectué, dans le chenal expérimental, pour six conditions de gradient hydraulique différent. Pour chacune des six conditions, la vitesse intergranulaire réelle a aussi été calculée.

### 8.2.3 Résultats

La figure 8.5 illustre une forte relation significative ( $R^2 = 0,83$  et  $p < 0.01$ ) entre la vitesse intergranulaire réelle calculée à partir du débit intergranulaire et le gradient hydraulique, confirmant la fiabilité du montage expérimental.

La figure 8.6 présente les six courbes illustrant la variation du traceur dans le temps. Ces courbes sont caractérisées par un mode, une moyenne et une étendue différents, mais ont toutes un coefficient d'asymétrie positif. Leur distribution est semblable. En effet, la concentration du traceur augmente très rapidement au début de la période d'échantillonnage, atteint une valeur maximale et diminue ensuite lentement sur une longue période de temps.

Puisque le paramètre le plus fréquemment utilisé dans la littérature à partir duquel on estime la valeur de la vitesse intergranulaire est le mode de la distribution, la vitesse de l'écoulement de chacune des six courbes a été estimée à partir de ce dernier. Cette valeur

de vitesse estimée est obtenue en divisant la valeur de la distance qui sépare le tuyau injecteur du piézomètre par le temps écoulé entre le début de l'injection et l'atteinte de la concentration maximale du traceur, qui correspond au mode de la distribution. Ces valeurs estimées de vitesse intergranulaire ont ensuite été comparées avec les valeurs de la vitesse réelle calculée à partir du débit intergranulaire (tableau 8.1). Les résultats du tableau 8.1 illustrent bien que les vitesses estimées à partir du mode ne correspondent pas aux valeurs de la vitesse intergranulaire réelle. Les valeurs de vitesse estimées sont inférieures aux valeurs réelles.

Afin de déterminer le ou les paramètres permettant d'estimer adéquatement la vitesse intergranulaire à partir d'une courbe de traçage, les six courbes de données brutes de la variation de la concentration en sel dans le temps ont d'abord été paramétrisées en une somme de deux log normales. La paramétrisation a été effectuée numériquement par un algorithme Quasi-Newton. La figure 8.7 illustre un exemple du résultat de cette paramétrisation et le tableau 8.2 présente les valeurs des différents paramètres de chacune des courbes de traçage de sel résultant de cette paramétrisation. Cette dernière se définit comme suit :

$$\text{Vitesse} = a_1 * \exp(-((\log(\text{temps}) - b_1)/c_1)^2) + a_2 * \exp(-((\log(\text{temps}) - b_2)/c_2)^2)$$

En second lieu, afin de prédire la vitesse intergranulaire en fonction des paramètres de chacune des courbes, une régression multiple linéaire a été effectuée entre ces paramètres et les valeurs de la vitesse réelle calculée à partir du débit intergranulaire. Le résultat indique que seuls les paramètres  $a_1$  et  $b_2$  des courbes paramétrisées sont significatifs ( $R^2 = 0.85$  et  $p < 0.05$ ). Ces deux paramètres ont été utilisés afin d'établir un modèle mathématique qui permet de déterminer la vitesse de l'écoulement intergranulaire à partir d'une courbe de traçage. L'équation du modèle est la suivante :

$$\text{Vitesse} = 0.885 a_1 - 0.78 b_2 + 0.155$$

où le paramètre  $a_1$  est associé à l'amplitude du pic de détection du sel (mode de la distribution), tandis que le paramètre  $b_2$  est associé à la position du pic dans le temps (moyenne de la distribution). Ainsi, la vitesse intergranulaire est reliée positivement au paramètre  $a_1$  et négativement au paramètre  $b_2$ .

#### 8.2.4 Discussion

Cette nouvelle démarche a d'abord permis de déterminer que le paramètre standard (i.e. mode), issu des courbes de la variation de la concentration d'un traceur dans le temps, n'est pas adéquat pour estimer la valeur moyenne de la vitesse de l'écoulement intergranulaire. En effet, nos résultats ont démontré que l'utilisation de la combinaison de deux paramètres est nécessaire. Par contre, préalablement à l'utilisation de cette nouvelle méthode pour déterminer la vitesse intergranulaire en milieu naturel à partir de courbes de traçage de sel, la validation du modèle mathématique est nécessaire.

Il est recommandé de procéder à la calibration du modèle mathématique en répétant l'expérience dans des substrats de mixtures différentes dans le but de déterminer si une modification de cette variable peut modifier les résultats obtenus. En effet, il est nécessaire de s'assurer que les paramètres significatifs issus de nos analyses seraient les mêmes pour des substrats de caractéristiques différentes et ainsi que l'équation du modèle resterait inchangée.

De plus, les résultats d'une étude récente suggèrent qu'un autre paramètre, issu de courbes de traçage, est aussi relié à la vitesse de l'écoulement intergranulaire. D'après Geist *et al.* (2006), la valeur de l'exposant de la courbe exponentielle décrivant la décroissance de la concentration du traceur dans le temps est reliée à la vitesse de l'écoulement intergranulaire. Il est donc recommandé de tenir compte également de ce nouveau paramètre lors de la calibration du modèle mathématique.

Pour l'instant, même si ces hypothèses restent à vérifier, on assume que l'équation du modèle mathématique développé est valable pour tous types de substrat caractéristique d'un site de fraie.

### **8.3 Évaluation de l'importance relative du gradient hydraulique et des caractéristiques du substrat sur la vitesse intergranulaire en milieu naturel**

#### **8.3.1 Introduction**

Comme mentionné à la section 8.1, on estime généralement la qualité d'une frayère en milieu naturel par une analyse granulométrique du substrat. Par ailleurs, selon la loi de Darcy, l'état du substrat n'est pas la seule variable affectant la vitesse de l'écoulement intergranulaire. Le gradient hydraulique contrôle aussi en grande partie cette variable. Les résultats d'une récente étude menée en laboratoire suggèrent que l'augmentation du gradient hydraulique augmente le taux de survie des embryons de saumon atlantique, mais que l'ampleur de l'effet dépend de la combinaison de la valeur du gradient hydraulique et de la composition exacte du substrat, particulièrement la teneur en sédiments fins (Lapointe *et al.*, 2004). L'importance du gradient hydraulique n'a encore jamais été vérifiée en milieu naturel, ni la prédominance possible d'une des variables (ex. : perméabilité, porosité du substrat) pouvant affecter la vitesse de l'écoulement intergranulaire.

À l'aide de la nouvelle méthode développée en milieu contrôlé, décrite à la section précédente (section 8.2), les objectifs de la section 8.3 sont d'abord, de mesurer la vitesse de l'écoulement intergranulaire dans une gamme de conditions différentes au droit de frayères. En second lieu, cet échantillonnage permettra entre autre de vérifier le rôle probable, mais encore jamais quantifié en milieu naturel, du gradient hydraulique sur l'écoulement intergranulaire et d'autre part, de déterminer l'importance relative des différentes variables qui régissent la vitesse de cet écoulement.

L'approche préconisée tient compte d'une part, des différents paramètres reliés à l'état du substrat de l'équation de Darcy, soit la conductivité hydraulique (K), la perméabilité (k) et la porosité (n) et d'autre part, du pourcentage de silt et sable très fin contenu dans le substrat. Cette variable est intégrée dans l'analyse, puisqu'une relation significative entre cette dernière et le taux de survie des embryons de saumon atlantique a été démontrée au chapitre 6. Il est à mentionner que l'analyse du gradient hydraulique en relation avec la vitesse de l'écoulement intergranulaire est effectuée à l'échelle du seuil ainsi qu'à l'échelle du nid.

### **8.3.2 Méthodologie**

#### **8.3.2.1 Travaux au terrain**

Afin d'obtenir une large gamme de conditions différentes, plusieurs sites potentiels pour la fraie du saumon atlantique ont été caractérisés sur deux rivières à saumon. La caractérisation a été effectuée sur onze seuils de la rivière Ste-Marguerite au Saguenay et sur trois seuils de la rivière Grande Caspédia en Gaspésie.

L'échantillonnage des différentes variables physiques a été effectué sur la tête des seuils, qui correspond à l'endroit privilégié par le saumon pour frayer. Sur chacun des seuils, un traçage de sel a d'abord été effectué. L'injecteur et le piézomètre, distancés d'environ 30 cm, étaient insérés dans le substrat à une profondeur d'environ 20 cm qui correspond à la profondeur d'un nid naturel de saumon. Une sonde de conductivité introduite dans le piézomètre permettait de mesurer la conductivité de l'eau intergranulaire. Pour effectuer le traçage de sel, une quantité d'eau (environ 1 litre) saturée en sel était introduite dans le tuyau injecteur. Suite à l'injection, une lecture de la sonde de conductivité était effectuée à toutes les 10 secondes et ce, jusqu'à ce que la conductivité revienne à la valeur de la concentration initiale notée au début de l'échantillonnage, soit celle de l'eau de la rivière.

Par la suite, un échantillon du substrat était récolté, à l'aide d'une cellule d'isolation du courant, à l'endroit où la vitesse intergranulaire avait été mesurée, afin de déterminer les caractéristiques du substrat. La partie grossière de l'échantillon était tamisée sur le terrain et un sous-échantillon de la partie plus fine (< 16 mm) était prélevé afin d'être séché puis tamisé en laboratoire pour une analyse plus détaillée des sédiments fins.

Une caractérisation détaillée de la pente de l'eau et de la topographie du lit de la rivière étaient effectuées à l'aide d'une station totale dans le but de déterminer le gradient hydraulique à l'échelle du nid et du seuil.

### 8.3.2.2 Traitement et analyses

#### *Substrat*

Les différents paramètres caractérisant le substrat ont été établis comme suit;

La porosité du substrat ( $n$ ) (Vukovic et Soro, 1987) a été déterminée par la formule suivante :

$$n = 0.255 (1 + 0.83^{-\eta})$$

où  $\eta = d_{60}/d_{10}$ . Le  $d_{10}$  et le  $d_{60}$  correspondent respectivement au diamètre dont 10 % et 60 % de l'échantillon est plus petit. La conductivité hydraulique du substrat ( $K$ ) a été déterminée par la formule de Kruger qui a été développée pour le domaine d'applicabilité des matériaux du sol caractérisés par un coefficient d'uniformité ( $\eta$ ) inférieur à 5 (Vukovic et Soro, 1987). Le coefficient d'uniformité de la majorité de nos échantillons est inférieur à cette valeur. La formule de Krüger (Vukovic et Soro, 1987) se définit comme suit :

$$K = 240 * (n / (1-n)^2) * d_e^2$$

où  $n$  est la porosité et  $d_e$  est le diamètre effectif des grains en mm qui se détermine à partir de la formule suivante :

$$1/d_e = \sum (\Delta g_i / d_i) = \sum \Delta g_i (2/d_i^g + d_i^d)$$

où  $\Delta g_i$  est le poids de chacune des fractions par rapport au poids total de l'échantillon,  $d_i$  est le diamètre moyen des particules associé à ces fractions,  $d_i^g$  est le diamètre maximum de ces fractions et  $d_i^d$  est le diamètre minimum de ces fractions. Enfin, le pourcentage de silt et de sable très fin, extrait de la courbe granulométrique de chacun des échantillons, a aussi été déterminé.

### ***Gradient hydraulique***

En ce qui concerne le gradient hydraulique, celui à l'échelle du nid a été établi à partir de la pente de la surface de l'eau entre l'injecteur et la sonde de conductivité. Pour ce qui est de celui à l'échelle du seuil, c'est la pente du niveau d'eau maximale qui a été utilisée. Cette pente correspond à la distance entre le sommet du seuil et le début de la fosse.

### ***Vitesse intergranulaire***

Les courbes de traçage de sel obtenues en milieu naturel n'ont pas exactement la même allure que les courbes obtenues en conditions contrôlées (section 8.2.3). La figure 8.8 illustre cinq des quatorze courbes résultantes des essais menés en rivière. Règle générale, l'allure de ces courbes démontre, qu'en milieu naturel, la concentration du traceur diminue beaucoup plus rapidement après avoir atteint sa valeur maximale comparativement aux courbes obtenues en milieu contrôlé (figure 8.6).

Le tableau 8.3 présente le coefficient d'asymétrie des courbes de traçage de sels obtenues en milieu contrôlé et en milieu naturel. Un coefficient d'asymétrie négatif correspond à une courbe asymétrique à gauche et un coefficient positif correspond à une courbe asymétrique à droite. La valeur nulle (0) est donc associée à une distribution normale. Les résultats du tableau 8.3 confirment que les courbes obtenues en milieu contrôlé sont généralement différentes des courbes obtenues en milieu naturel, puisque les coefficients d'asymétrie sont tous négatifs en milieu contrôlé comparativement à des valeurs généralement positives pour les courbes obtenues en milieu naturel.

Malgré cette dissemblance, on assume pour l'instant que le modèle mathématique développé en laboratoire est valide pour ce type de courbe. Ce dernier a donc été utilisé afin d'extraire la valeur de la vitesse intergranulaire de chacune des courbes de traçage de sel obtenues en rivière. Par ailleurs, mentionnons que cette hypothèse d'applicabilité du modèle en milieu naturel reste à vérifier.

### *Analyses statistiques*

Des analyses statistiques ont été réalisées dans le but de déterminer l'importance relative du gradient hydraulique et des caractéristiques du substrat sur la vitesse de l'écoulement intergranulaire. Des analyses de corrélation linéaire simple ont d'abord été effectuées entre les valeurs de la vitesse de l'écoulement intergranulaire obtenues par le modèle et chacune des variables du substrat (i.e. K, n, % sédiments fins) et le même exercice a été effectué avec les variables du gradient hydraulique (i.e. échelles du seuil et du nid). Des analyses de régression multiple ont ensuite été effectuées sur l'ensemble des variables, incluant celles des caractéristiques du substrat et celles du gradient hydraulique, et ce en relation avec la vitesse intergranulaire. Ce type d'analyse permet de tenir compte de la relation possible entre les différentes variables.

### 8.3.3 Résultats

Le tableau 8.4 présente les conditions dans lesquelles l'échantillonnage s'est effectué. Une large gamme de gradients hydrauliques, de caractéristiques du substrat (K, n et % sédiments fins) et de vitesses intergranulaires a été mesurée.

#### *Corrélation simple*

Les résultats des analyses de corrélation linéaire simple entre la vitesse intergranulaire et les différentes variables des caractéristiques du gradient hydraulique (échelles du nid et du seuil) et du pavement et du sous-pavement (K, n, % sédiments fins) n'ont démontrés aucune relation significative à  $p < 0,05$  (tableau 8.5). Les valeurs les plus élevées semblent tout de même indiquer une relation positive entre la vitesse intergranulaire et le gradient hydraulique à l'échelle du seuil et en second lieu avec la porosité (n) et la conductivité hydraulique (K) du pavement.

#### *Régression multiple*

Le résultat de la régression multiple (stepwise) effectuée entre la vitesse intergranulaire et les différentes variables du gradient hydraulique et du substrat n'indique aucune relation significative ( $R^2 = 0.32$ ,  $p = 0.09$ ) entre les différentes variables.

### 8.3.4 Discussion

À prime abord, il semble surprenant que nos résultats n'indiquent aucune relation significative entre la vitesse de l'écoulement intergranulaire et les différentes variables du gradient hydraulique et du substrat. En effet, il était attendu d'obtenir des résultats similaires à ceux obtenus en laboratoire par Lapointe *et al.* (2004), qui ont démontré qu'une augmentation du taux de survie des embryons de saumon atlantique était associée

non seulement au gradient hydraulique mais aussi à la composition exacte du substrat (i.e. teneur en sédiments fins). Toutefois, plusieurs raisons peuvent expliquer nos résultats.

D'abord, les résultats issus des analyses statistiques sont sujets à une certaine incertitude puisque, comme mentionné précédemment (section 8.3.2.2 *Vitesse intergranulaire*), le modèle mathématique issu de nos expérimentations menées en milieu contrôlé n'est peut-être pas valide pour extraire la valeur de la vitesse intergranulaire des courbes de traçage de sel obtenues en milieu naturel, car l'allure des courbes est généralement différente entre les deux types de milieux. Il est donc recommandé de vérifier cette hypothèse.

D'autre part, il est probable que les conditions dans lesquelles l'échantillonnage a été mené en milieu naturel puissent aussi expliquer en partie l'absence de relation illustrée par nos résultats. L'ensemble de la réflexion repose sur la loi de Darcy. Toutefois, cette loi ne s'applique qu'en conditions d'écoulement laminaire, qui ne sont généralement pas les conditions que l'on retrouve en milieu naturel. En effet, l'écoulement est habituellement turbulent en milieu naturel.

Il est possible de déterminer si les conditions d'écoulement intergranulaire lors de nos essais menés en milieu naturel étaient laminaires ou turbulentes en calculant le nombre de Reynolds intergranulaire par la formule suivante :

$$Re_{\text{intergranulaire}} = d * V_i * D_{50} / \nu$$

où  $d$  est la densité de l'eau,  $V_i$  est la vitesse intergranulaire,  $D_{50}$  est le diamètre moyen de l'échantillon granulométrique et  $\nu$  est la viscosité de l'eau. Cette équation, provient de Freeze et Cherry (1979). Si la valeur du  $Re$  de l'écoulement intergranulaire est inférieure à 5, l'écoulement est considéré laminaire et la loi de Darcy est valide. Par ailleurs, si la valeur est supérieure à 5, l'écoulement est en phase transitoire ou est turbulent et la loi de Darcy n'est donc pas applicable.

Le tableau 8.6 présente les résultats du calcul du nombre de Reynolds de l'écoulement intergranulaire de nos essais de traçage de sel en milieu naturel. Les résultats indiquent que l'ensemble des essais a été mené en conditions d'écoulement intergranulaire turbulent. La loi de Darcy n'est donc pas applicable, ce qui pourrait expliquer les dissemblances entre nos résultats et ceux obtenus en laboratoire qui ont probablement été menés en conditions d'écoulement laminaire.

Enfin, même si les conditions dans lesquelles nos expérimentations menées en milieu naturel peuvent expliquer en partie l'absence de relations entre les différentes variables, plusieurs limitations liées à l'échantillonnage peuvent aussi avoir contribué à ce résultat.

D'abord, la méthode utilisée pour mesurer le gradient hydraulique (i.e. station tachéométrique) était probablement imprécise, plus particulièrement pour déterminer le gradient hydraulique à l'échelle du nid. La différence de quelques centimètres de hauteur d'eau entre deux points de mesure doit être déterminée avec une plus grande précision, par exemple en utilisant une jauge à niveau d'eau.

D'autre part, lors des essais de traçage de sel, il aurait été préférable de déterminer avec précision la concentration initiale en sel de l'eau injectée. Cette information aurait permis de calculer la vitesse intergranulaire par une formule largement utilisée en hydrogéologie, soit celle provenant de la courbe de fuite d'un traceur (Freeze et Cherry, 1979), qui se définit ainsi :

$$V_i = d / t \text{ à } 0,5 \text{ de } (C/C_0)$$

où  $d$  est la distance entre l'injecteur et le piézomètre,  $t$  est le temps de l'échantillonnage,  $C$  est la concentration de sel à chaque moment lors de l'échantillonnage et  $C_0$  est la concentration de sel initiale. À 50 % de la courbe de la relation  $C/C_0$ , correspond la valeur du temps requis pour calculer la vitesse intergranulaire.

Enfin, il aurait aussi été nécessaire de noter le volume exact d'eau salée injecté lors des essais de traçage afin de déterminer si le volume d'eau injecté biaisait la mesure de la vitesse intergranulaire. Selon la littérature, des injections d'eau salée en trop grande quantité peuvent contaminer la vitesse intergranulaire (fausse accélération) par une trop grande dispersion du nuage d'eau salée. Il est possible de mesurer ce phénomène en déterminant le rayon d'injection du nuage d'eau salée injectée, par la formule suivante :

$$r^2 = v / (\pi * h * n)$$

où  $r$  est le rayon d'injection,  $v$  est le volume d'eau injecté,  $h$  est la profondeur de la crépine dans le substrat et  $n$  est la porosité du substrat. Si le rayon d'injection est plus petit que la distance qui sépare l'injecteur du piézomètre, aucune contamination n'est possible. Par contre, si la valeur du rayon est plus grande ou égale à la distance entre les deux tuyaux, le risque de contamination est grand et il est préférable de laisser tomber cet essai d'échantillonnage.

#### **8.4 Conclusion**

Malgré l'aspect préliminaire de l'ensemble des résultats présentés dans ce chapitre, ces derniers ont tout de même démontré que les interactions entre la vitesse de l'écoulement intergranulaire et les différentes variables du gradient hydraulique et du substrat sont complexes et restent difficiles à caractériser.

Par ailleurs, puisque le gradient hydraulique semble une variable importante pouvant modifier la qualité de l'environnement intragravier dans lequel se développe les embryons de saumon, il est donc recommandé de remédier aux différentes lacunes et interrogations soulevées aux sections 8.2.4 et 8.3.4, afin d'être en mesure de le caractériser adéquatement.

Dans un premier temps, il faudrait procéder à la validation du modèle mathématique présenté à la section 8.2. Ainsi, il serait nécessaire de répéter l'expérience en utilisant différents mélanges granulométriques, typiques de sites de fraie. Par conséquent, les résultats de cette nouvelle expérimentation permettraient de standardiser le modèle pour une gamme variée de substrat que l'on peut retrouver en milieu naturel. Ceci justifierait l'utilisation du modèle pour extraire avec confiance la valeur de la vitesse intergranulaire à partir de courbes de traçage de sel provenant d'échantillonnage en milieu naturel.

Suite à l'établissement d'un modèle mathématique solide et fiable, il serait ainsi envisageable de répéter l'expérience menée en milieu naturel, présentée à la section 8.3, tout en remédiant aux différentes lacunes méthodologiques décrites précédemment (section 8.3.4). Dans l'optique d'effectuer une analyse statistique complète et significative entre les différentes variables, il serait nécessaire de procéder à l'échantillonnage de ces variables sur un plus grand nombre de seuils.



## Références

- Freeze, R.A. et Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. 604 pages.
- Grost, R.T., Wesche, T.A., Young, M.K., Hubert, W.A. et Hasfurther, V.R. (1988). Evaluation of procedures to measure intragravel water velocity in streambeds. Technical report. WWRC-88-03. US Geological Survey, pp. 1-23.
- Harvey, J.W. et Bencala, K.E. (1993). The effect of streambed topography on surface-subsurface water exchange in mountain catchments. *Water Resources Research* (29), no. 1 : 89-98.
- Lapointe, M.F., Bergeron, N.E., Bérubé, F., Pouliot, M.-A. et Johnston, P. (2004). Interactive effects of substrate sand and silt contents, redd-scale hydraulic gradients, and interstitial velocities on egg-to-emergence survival of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* (61) : 2271-2277.
- Park, Y.-J., Sudicky, E.A., McLaren, R.G. et Sykes, J.F. (2004). Analysis of hydraulic and tracer response tests within moderately fractured rock based on a transition probability geostatistical approach. *Water resources Research* (40-W12404).
- Thibodeaux, L.J. et Boyle, J.D. (1987). Bedform generated convective transport in bottom sediment. *Nature* (325) : 341-343.
- Vukovic, M. et Soro, A. (1987). *Determination of hydraulic conductivity of porous media from grain-size composition*. Water Resources Publications, Littleton, Colo.

Tableau 8.1 Vitesses intergranulaires estimées à partir du temps écoulé pour atteindre la valeur maximale de concentration du traceur (i.e mode de la courbe de traçage de sel) de chaque essai et vitesses réelles calculées à partir du débit intergranulaire.

	<b>Vitesse estimée (cm/s)</b>	<b>Vitesse réelle (cm/s)</b>
Essai 1	0,116	0,154
Essai 2	0,069	0,141
Essai 3	0,08	0,186
Essai 4	0,076	0,085
Essai 5	0,054	0,085
Essai 6	0,083	0,149

Tableau 8.2 Paramètres des essais de traçage de sel et vitesse réelle calculée à partir du débit intergranulaire.

	Vi réelle (cm/s)	Paramètres des courbes					
		a1	b1	c1	a2	b2	c2
Essai 1	0.154	1 757	1.3	1.6	1 307	3.3	1.7
Essai 2	0.141	973.5	2,85	1,19	950.7	2.7	2.1
Essai 3	0.186	1 959	-71	71.1	530.5	2.1	1.8
Essai 4	0.085	466.4	-9.9	24.2	1 112	2.72	2.26
Essai 5	0.085	1 618	2.16	2.2	599.5	4.63	1.37
Essai 6	0.149	2 172	2.04	1.99	658.4	4.18	1.18

Tableau 8.3 Valeurs du coefficient d'asymétrie des courbes résultantes des essais de traçage de sel menés en milieu contrôlé et en milieu naturel.

<b>Condition d'échantillonnage (milieu)</b>	<b>Site</b>	<b>Coefficient d'asymétrie*</b>
Contrôlé	Essai 1	<b>-0,47</b>
Contrôlé	Essai 2	<b>-1,05</b>
Contrôlé	Essai 3	<b>-0,11</b>
Contrôlé	Essai 4	<b>-1,16</b>
Contrôlé	Essai 5	<b>-1,41</b>
Contrôlé	Essai 6	<b>-0,64</b>
Naturel	SM1	0,6
Naturel	SM2	0,15
Naturel	SM3	1,83
Naturel	SM4	<b>-0,03</b>
Naturel	SM5	<b>-0,1</b>
Naturel	SM6	<b>-0,12</b>
Naturel	SM7	0,03
Naturel	SM8	1,6
Naturel	SM9	0,12
Naturel	SM10	0,7
Naturel	SM11	0,4
Naturel	GC1	<b>-0,33</b>
Naturel	GC2	1,59
Naturel	GC3	3,97

SM : Rivière Ste-Marguerite

GC : Rivière Grande Cascapédia

\* Coefficient négatif = asymétrie à gauche  
Coefficient positif = asymétrie à droite

Tableau 8.4 Conditions d'échantillonnage des seuils à l'étude.

Site	Vi (cm/s)	dh/dl		Caractéristiques du substrat					
				K (cm/s)		n		% ≤ 0.125mm	
		seuil	nid	Pavement	Sous-pavement	Pavement	Sous-pavement	Pavement	Sous-pavement
SM1	0,129	0,014	nd	0,00016	0,00004	0,29	0,26	0,078	0,235
SM2	0,080	0,013	nd	0,00023	0,00004	0,33	0,26	0,033	0,194
SM3	0,137	0,019	nd	0,00035	0,00004	0,33	0,28	0,096	0,106
SM4	0,067	0,022	0,0007	0,00016	0,00004	0,31	0,27	0,033	0,114
SM5	0,134	0,026	0,0005	0,00032	0,00004	0,40	0,32	0,016	0,085
SM6	0,132	0,015	0,0150	0,00050	0,00005	0,37	0,30	0,012	0,062
SM7	0,108	0,015	0,0060	0,00010	0,00005	0,26	0,26	0,091	0,069
SM8	0,149	0,018	0,0110	0,00017	0,00003	0,31	0,26	0,041	0,117
SM9	0,109	0,012	0,0002	0,00020	0,00007	0,29	0,26	0,057	0,114
SM10	0,109	0,019	0,0060	0,00010	0,00003	0,29	0,26	0,032	0,135
SM11	0,123	0,021	0,0018	0,00014	nd	0,30	nd	0,037	nd
GC1	0,101	0,024	nd	0,00023	0,00006	0,31	0,26	0,144	0,314
GC2	0,169	0,016	nd	0,00017	0,00005	0,30	0,26	0,104	0,167
GC3	0,267	0,009	nd	0,00037	0,00006	0,37	0,26	0,018	0,106

SM : Rivière Ste-Marguerite

GC : Rivière Grande Cascapédia

Vi : Vitesse intergranulaire estimée en utilisant l'équation du modèle mathématique développé à la section 8.2.

dh/dl: Gradient hydraulique, calculé à l'échelle du seuil et à l'échelle du nid.

K : conductivité hydraulique

n : porosité

% ≤ 0.125mm : % du contenu total des échantillons de la quantité de sédiments dont le diamètre est inférieur à 0,125 mm

nd : donnée non disponible

Tableau 8.5 Résultats des corrélations simples entre la vitesse intergranulaire et les variables du gradient hydraulique et des caractéristiques du substrat.

<b>dh/dl</b>		<b>Caractéristiques du substrat</b>						
		<b>K (cm/s)</b>		<b>n</b>		<b>% ≤ 0.125mm</b>		
nid	seuil	Pavement	Sous-pavement	Pavement	Sous-pavement	Pavement	Sous-pavement	
R	-0,02	0,56	0,42	-0,13	0,42	0,33	-0,23	-0,25

Tableau 8.6 Valeurs du nombre de Reynolds de l'écoulement intergranulaire des seuils étudiés.

Site	Nombre de Reynolds (écoulement intergranulaire)	Conditions d'écoulement
SM1	28,4	Turbulent
SM2	11,5	Turbulent
SM3	21,0	Turbulent
SM4	14,3	Turbulent
SM5	49,8	Turbulent
SM6	52,5	Turbulent
SM7	6,5	Turbulent
SM8	41,5	Turbulent
SM9	6,1	Turbulent
SM10	18,9	Turbulent
SM11	nd	nd
GC1	16,2	Turbulent
GC2	25,7	Turbulent
GC3	100,1	Turbulent

SM : Rivière Ste-Marguerite

GC : Rivière Grande Cascapédia

nd : donnée non disponible

Règle de décision : Si  $Re < 5$ , l'écoulement est laminaire et si  $Re > 5$ , l'écoulement est turbulent.

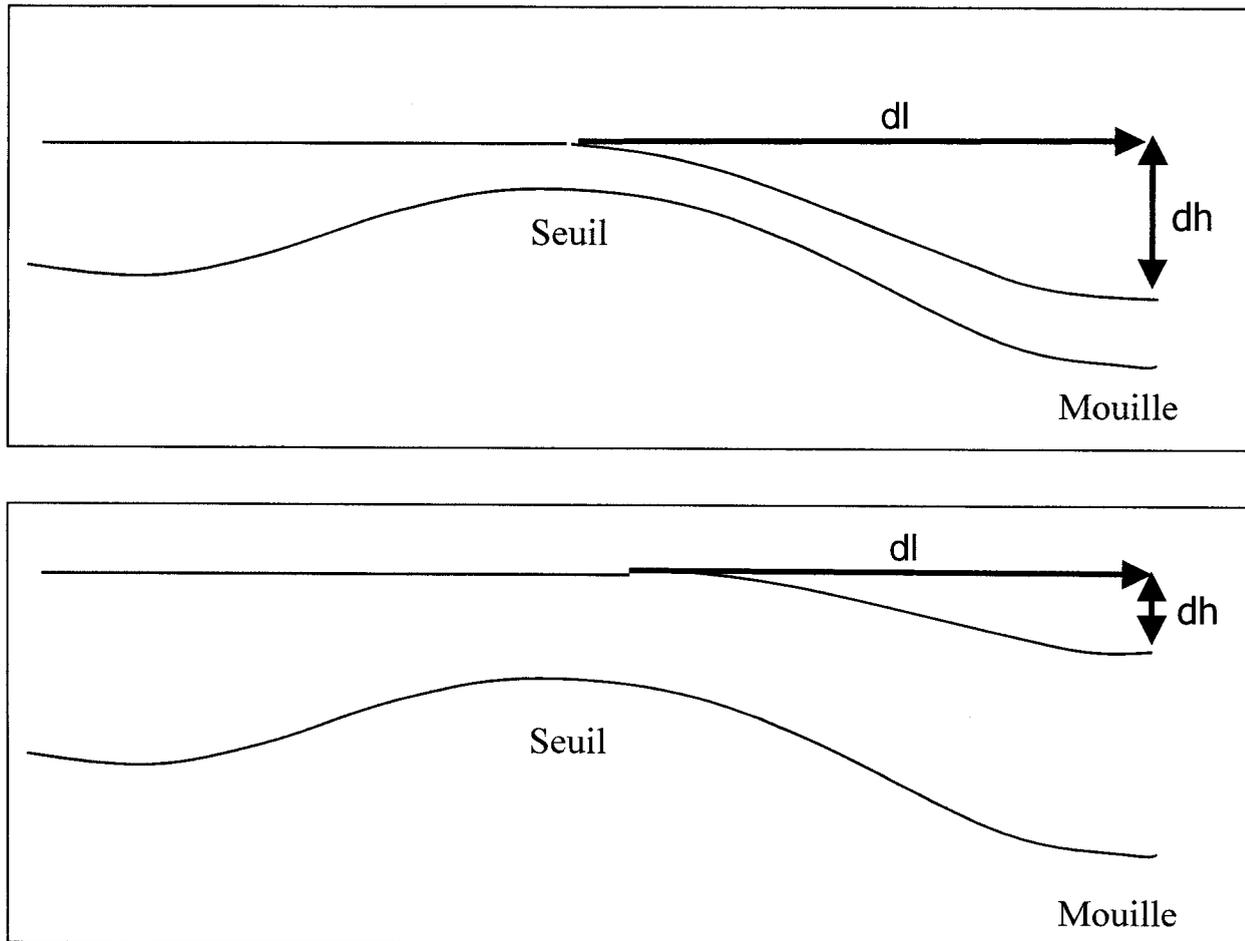


Figure 8.1 Illustration schématique de l'impact d'une augmentation du niveau d'eau sur le gradient hydraulique.



Figure 8.2    Chenal expérimental.

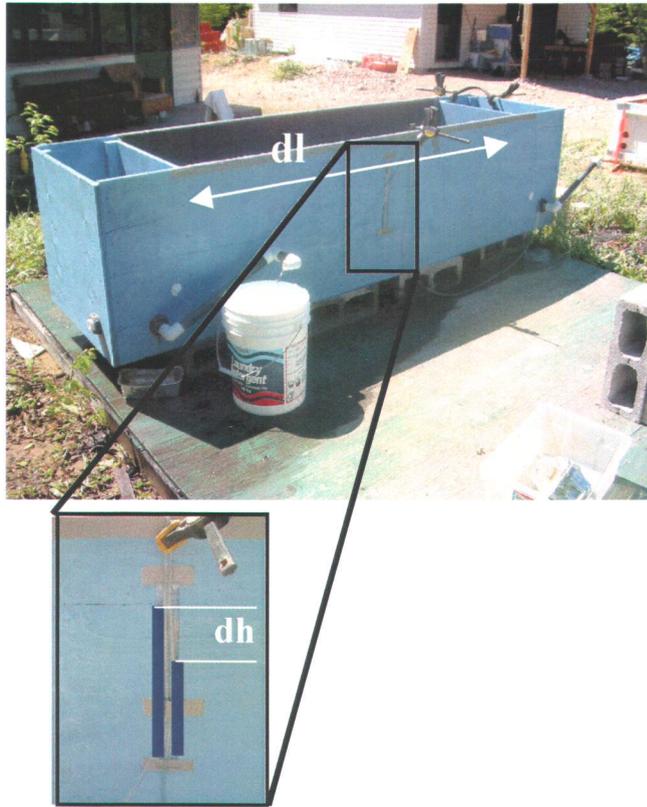


Figure 8.3 Détermination du gradient hydraulique en conditions contrôlées.

**Injecteur****Piézomètre**

Figure 8.4 Design expérimental pour l'échantillonnage de la vitesse intergranulaire par traçage de sel.

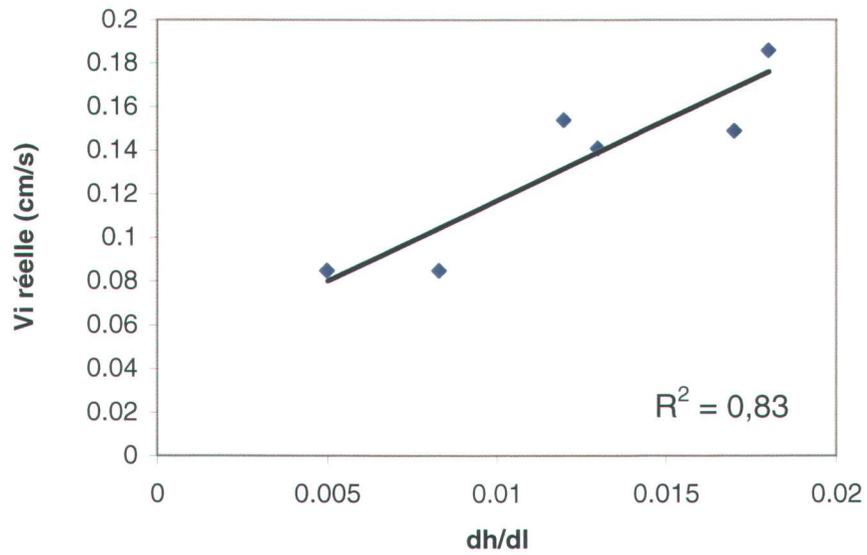


Figure 8.5 Relation linéaire entre le gradient hydraulique et la vitesse intergranulaire réelle calculée à partir du débit intergranulaire pour les six conditions d'échantillonnage menées en milieu contrôlé.

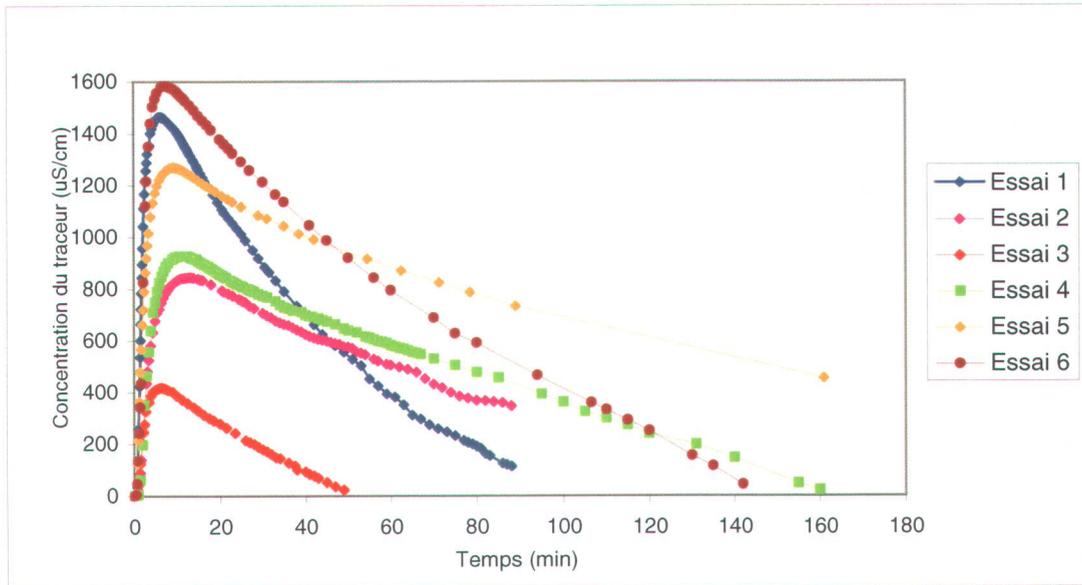
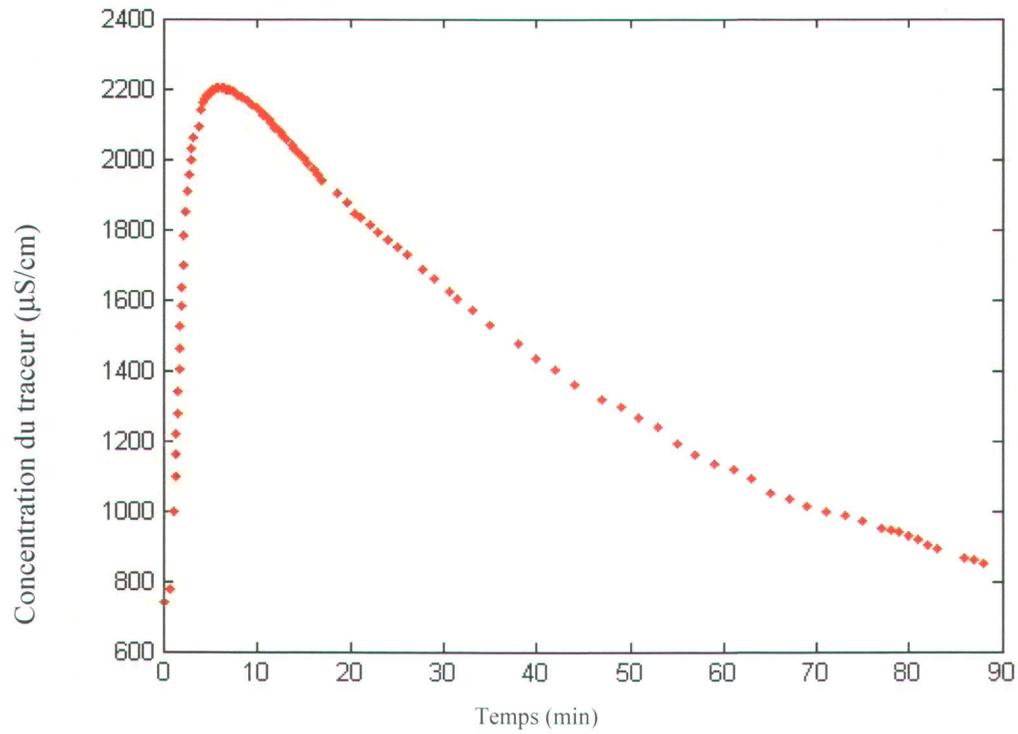


Figure 8.6 Courbes résultantes des essais de traçage de sel menés en conditions contrôlées. La concentration du traceur correspond à une mesure de la conductivité de l'eau exprimée en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

A)



B)

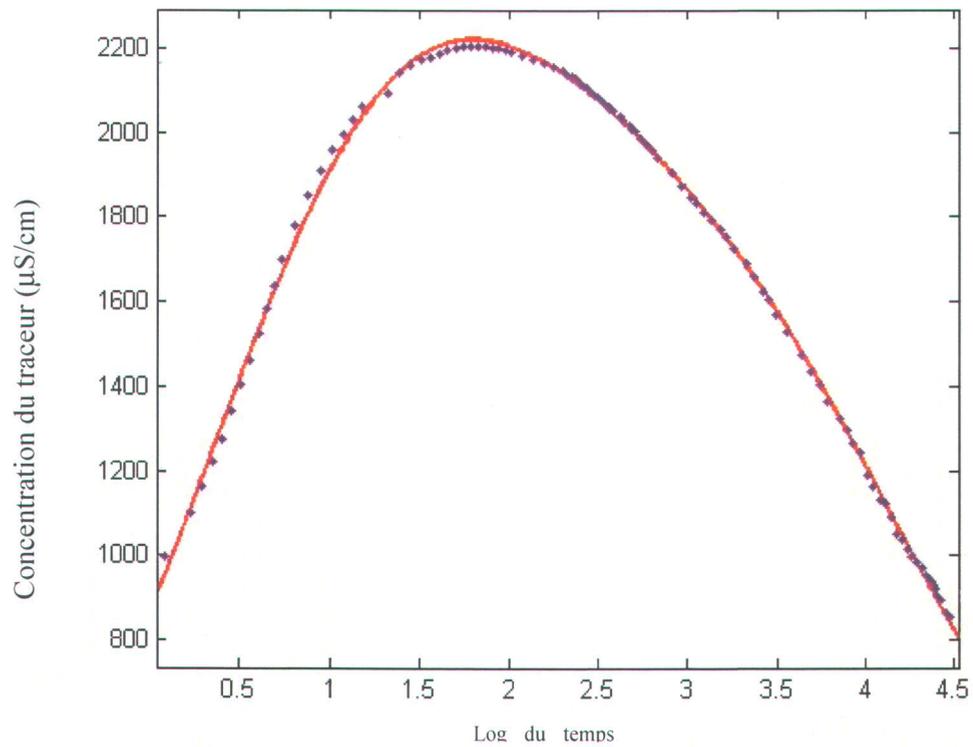


Figure 8.7 A) Courbe typique d'un essai de traçage de sel. B) Paramétrisation (trait plein) d'une courbe typique (trait pointillé) d'un des essais de traçage.

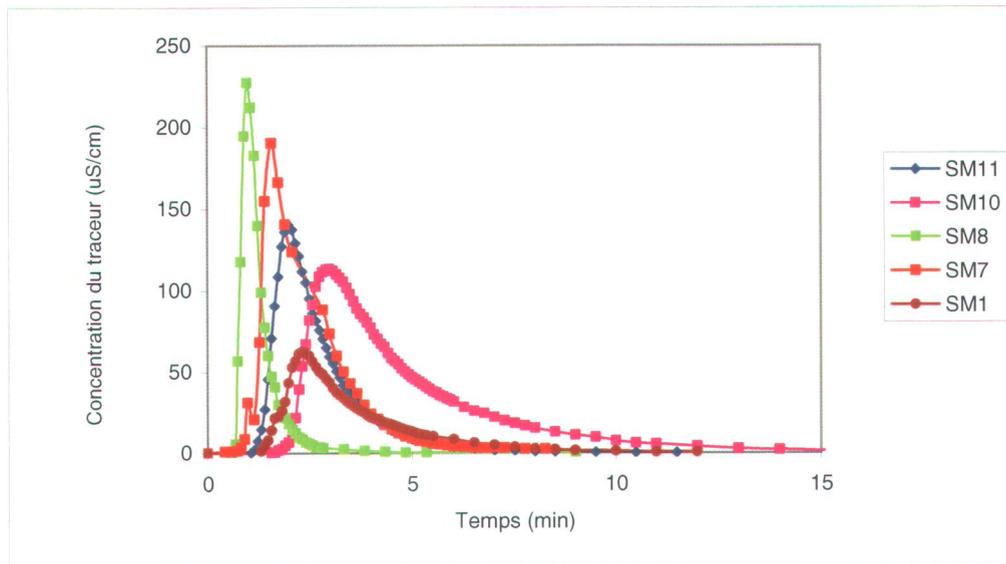


Figure 8.8 Exemples des courbes résultantes des essais de traçage de sel menés en milieu naturel. La concentration du traceur correspond à une mesure de la conductivité de l'eau exprimée en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .



## CONCLUSION GÉNÉRALE

---

Les travaux réalisés au cours de ce doctorat contribuent à l'avancement de la science dans les domaines de l'environnement, de la biologie aquatique et de la géomorphologie fluviale. Ces travaux ont permis de remédier à certains manquements techniques et méthodologiques concernant les impacts des sédiments fins sur la survie des embryons de salmonidés. Il était nécessaire de d'abord pallier à ces lacunes afin d'atteindre l'objectif principal de cette thèse qui était d'acquérir davantage de connaissances sur certains facteurs et processus qui peuvent modifier l'environnement intragravier dans lequel se développent les embryons lors de la période d'incubation.

Plus spécifiquement, le premier objectif consistait à développer une nouvelle technique permettant d'échantillonner en simultané la quantité de sédiments fins présents dans le substrat de fraie ainsi que la survie des embryons de saumon atlantique (chapitre 5). Il était nécessaire de développer cette nouvelle technique, car aucune des techniques actuellement disponibles ne permettait de documenter ces deux variables simultanément. L'objectif a été atteint et cette nouvelle technique constitue maintenant un outil essentiel en ce qu'elle permet 1) d'échantillonner le substrat ainsi que la survie des embryons à plusieurs moments lors de la période d'incubation, 2) d'échantillonner dans un environnement qui possède des caractéristiques morpho-sédimentologiques semblables à celles d'un nid naturel de saumon et 3) d'échantillonner sous couvert de glace. Aucune des méthodes existantes ne permettait de répondre à l'ensemble de ces critères.

Cette nouvelle technologie nous a ensuite permis d'acquérir de nouvelles connaissances concernant la dynamique spatiale et temporelle de l'infiltration des sédiments fins dans les nids de saumon durant l'incubation (chapitre 6). En effet, aucune étude n'avait encore permis de déterminer à quels moments lors de l'incubation se produisaient les événements d'infiltration et quels en étaient leurs impacts sur la survie des embryons.

D'abord, malgré le fait que l'impact négatif des sédiments très fins (i.e. les silts) sur la survie des embryons avait été tout récemment souligné lors d'études menées en laboratoire, il n'existait que très peu d'études menées en milieu naturel qui démontraient cette relation. Nos résultats, issus d'échantillonnages menés en milieu naturel, ont indiqué que les silts ainsi que les sables très fins étaient précisément les deux classes de sédiments les plus dommageables pour la survie des embryons de saumon atlantique.

Notre analyse de la dynamique temporelle de l'infiltration des sédiments fins dans le substrat de fraie durant l'incubation, nous a aussi permis de déterminer à quels moments se produisaient les événements d'infiltration. Tout indique que l'infiltration des sédiments très fins dans le substrat de fraie se produit principalement pendant la période hivernale, soit lors des faibles débits. Toutefois, nos résultats ont aussi démontré que la crue printanière semble parfois être propice à la mise en place des processus d'infiltration, mais que cette dynamique est beaucoup plus complexe que lors de la période hivernale. En effet, les résultats ont indiqué que la crue permettait de purger le substrat d'une quantité de sédiments fins dans certaines zones des sites à l'étude, tandis que dans d'autres zones, elle favorisait plutôt l'infiltration. La localisation spatiale des échantillons, qui implique une variabilité des conditions auxquelles sont soumis les échantillons, a été proposée pour tenter d'expliquer ce phénomène. Ceci illustre l'importance de considérer la variabilité spatiale pour une meilleure compréhension de la dynamique temporelle de l'infiltration. En définitive, l'effet de la crue printanière sur les processus d'infiltration est un phénomène complexe qui mérite d'être mieux documenté entre autres, en intégrant une composante spatiale à l'analyse. Des recommandations spécifiques ainsi que des expériences supplémentaires sont d'ailleurs suggérées à la section suivante (i.e. Recommandations et travaux futurs).

Une meilleure connaissance de la dynamique temporelle et spatiale de l'infiltration est essentielle, car elle permet entre autres d'agir de façon plus efficace lors d'intervention de nettoyage du substrat de fraie. Ce type d'opération est généralement effectué par les gestionnaires de rivières qui tentent d'améliorer la qualité des sites de fraie afin de favoriser la reproduction de l'espèce. Par ailleurs, comme exposé au chapitre 3, très peu

de techniques simples et peu coûteuses sont actuellement disponibles afin d'évacuer efficacement les sédiments fins hors du substrat des frayères. Nous avons donc développé un nouvel appareil dans le but de nettoyer l'habitat de fraie du saumon tout en remédiant aux inconvénients des méthodes déjà existantes (chapitre 7). La nouvelle technique est simple, facile à utiliser et peu coûteuse. Cette technique utilise la force de l'écoulement pour fonctionner, ce qui constitue un avantage intéressant comparativement aux autres méthodes connues qui nécessitent l'utilisation d'une source d'énergie supplémentaire pour fonctionner.

Des essais en milieu naturel ont permis de démontrer que cette nouvelle technique de nettoyage est généralement efficace et permet de diminuer la quantité de sédiments fins dans le substrat suite à son utilisation. Par ailleurs, les résultats ont aussi mis en évidence l'importance de considérer les conditions d'écoulement qui prévalent sur les sites à nettoyer. Par exemple, lors de nos essais, l'appareil semblait totalement inefficace pour des conditions de très faibles vitesses d'écoulement. En effet, puisque notre technique est hydromotrice, les conditions d'écoulement (vitesse et profondeur) sont déterminantes pour assurer le bon fonctionnement de l'appareil. Il est donc essentiel de déterminer les limites d'applicabilité et d'efficacité de cet appareil. Pour y parvenir, il est recommandé d'effectuer des essais exhaustifs en milieu naturel pour tester cet appareil dans des conditions d'écoulements variées et sur des sites de fraie de caractéristiques granulométriques différentes.

Le dernier chapitre de la thèse (chapitre 8) est un chapitre complémentaire aux chapitres 5, 6 et 7, en ce qu'il porte sur l'analyse de variables autres que spécifiquement la quantité de sédiments fins en relation avec la qualité de l'environnement intragravier dans lequel se développe les embryons de saumon. L'objectif principal de ce chapitre consistait à déterminer l'importance relative du gradient hydraulique sur la vitesse de l'écoulement intergranulaire en milieu naturel. Cette relation n'avait jusqu'à présent été démontrée qu'en conditions contrôlées. L'objectif n'a été que partiellement atteint, puisque l'ensemble des résultats n'était pas statistiquement significatif. Par ailleurs, les conditions

dans lesquelles l'échantillonnage a été mené ainsi que plusieurs limitations reliées à l'échantillonnage peuvent avoir affecté la qualité des données récoltées ainsi que les résultats obtenus. D'ailleurs, la section 8.3.4 du chapitre 8 est entièrement consacrée à la description détaillée de ces lacunes et propose des solutions pour y remédier. Enfin, malgré l'aspect préliminaire de ces résultats, ils constituent tout de même de nouvelles avenues de recherche. Pour une première étude menée en milieu naturel, ces expérimentations auront du moins permis d'identifier certains problèmes qui pourront être évités dans le cadre de futures recherches. D'ailleurs, des expériences supplémentaires spécifiques à cette problématique sont recommandées et sont présentées à la section 8.4 du chapitre 8.

### **Recommandations et travaux futurs**

Dans l'optique d'être en mesure d'agir efficacement dans le maintien ou l'amélioration des conditions intragraviers nécessaires au bon développement des embryons, il est de mise de mieux documenter les processus de la dynamique sédimentaire dans le substrat de fraie pendant la période d'incubation.

Il est d'abord recommandé de clarifier la complexité des processus d'expulsion et d'infiltration des sédiments fins dans le substrat de fraie qui surviennent lors d'événements de crue majeure (i.e. crue de printemps), tout en intégrant une composante spatiale à l'analyse. Pour ce faire, d'autres expériences en milieu naturel sont nécessaires. Un design expérimental semblable à celui présenté au chapitre 6 est envisagé. Par ailleurs, le plan initial devrait être amélioré par l'ajout de la caractérisation de nouvelles variables. Il serait indispensable d'échantillonner le transport en suspension, à l'aide d'un turbidimètre, sur l'ensemble de la période d'incubation. Nos résultats ont indiqué certaines relations entre les caractéristiques du transport en charge de fond et les processus d'infiltration/expulsion des sédiments fins, mais le transport en suspension n'a pas été caractérisé. Étant donné que ce dernier assure le déplacement des particules les

plus fines sur l'ensemble de la période d'incubation, il serait important d'en déterminer l'impact sur les processus d'infiltration.

La vitesse de l'écoulement intergranulaire ainsi que la quantité en oxygène dissous dans les nids artificiels sont deux autres variables qu'il serait important de documenter. L'échantillonnage en continu de ces deux variables, qui sont deux bons indicateurs de la qualité de l'environnement intragravier dans lequel se développent les embryons, permettrait de déterminer l'état des nids tout au long de la période d'incubation.

Dans le même ordre d'idées, étant donné que la majorité de la période d'incubation est soumise à l'influence des conditions hivernales, il serait nécessaire de déterminer l'impact d'un couvert de glace et de la glace de fond sur les conditions intragraviers. Par exemple, advenant la mise en place d'une glace de fond sur le substrat d'une frayère, comment cette dernière affecte-t-elle les conditions intragraviers? Est-il possible que la glace de fond puisse empêcher l'infiltration de sédiments fins à l'intérieur d'un nid? Si tel est le cas, bloque-t-elle du même coup les apports en oxygène vers les embryons par une modification des conditions d'écoulement intergranulaire? Étant conscient des difficultés liées à l'échantillonnage en conditions hivernales, il serait tout de même nécessaire d'élaborer un plan d'échantillonnage qui permettrait de répondre à ce type de questions.

En définitive, afin d'obtenir un portrait détaillé de l'impact des différentes variables sur les conditions intragraviers, l'échantillonnage de l'ensemble de ces nouvelles variables devrait être répliqué sur plusieurs rivières à saumon de caractéristiques physiques différentes. De plus, dans l'optique de déterminer de façon plus spécifique l'impact des différentes variables du milieu physique sur les stades de développement des embryons, il est proposé d'analyser l'état de ces derniers à différents moments lors de la période d'incubation. Ceci représente un effort d'échantillonnage non négligeable, mais qui mérite d'être tout de même envisagé.

Enfin, une autre difficulté technique qui mériterait d'être surmontée pour la pertinence des informations qui pourrait en découler consisterait à tenter de simuler avec du sable coloré les patrons d'infiltration des sédiments fins dans un nid de saumon. Pour y arriver, suite à l'infiltration du traceur, le substrat du nid pourrait être gelé à l'aide de la technique du freeze core, pour ensuite être analysé de façon détaillée par tomographie. Ceci permettrait d'une part, de déterminer la stratigraphie d'un nid naturel et d'autre part, de mieux comprendre ce qui se passe à l'intérieur de ce dernier en termes de dynamique sédimentaire.

Malgré ces nombreuses recommandations et expériences supplémentaires suggérées, cette thèse constitue une contribution importante à l'avancement de la science en ce qu'elle a permis de progresser autant au plan technique qu'au niveau d'une meilleure compréhension des facteurs qui peuvent modifier l'environnement intragravier et ainsi affecter la survie des embryons de saumon atlantique durant la période d'incubation.

Les résultats ont entre autre fait ressortir que de multiples facteurs et processus peuvent modifier les conditions intragraviers pendant la période d'incubation. De plus, les interactions entre ces facteurs et processus sont nombreuses, très complexes et encore trop peu documentées. De ce fait, davantage d'études sont donc indispensables pour mieux comprendre ce qui contrôle les conditions intragraviers, afin de pouvoir éventuellement agir de façon plus efficace pour tenter de conserver ou d'améliorer la qualité de l'habitat de reproduction du saumon atlantique.

**ANNEXE 1****Complément au chapitre 7 concernant le développement d'une nouvelle technique de nettoyage du substrat :**

Effets du déflecteur sur les caractéristiques de l'écoulement

---



## **Introduction**

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.

## **Méthode**

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. 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 A1-1 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/m<sup>2</sup>. 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 A1-2 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. Les formules utilisées afin de calculer ces deux variables à partir de la méthode des stress de Reynolds sont les suivantes :

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.

$$\vec{u} = \bar{u} + u'$$

$$\vec{v} = \bar{v} + v'$$

$$\vec{w} = \bar{w} + w'$$

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

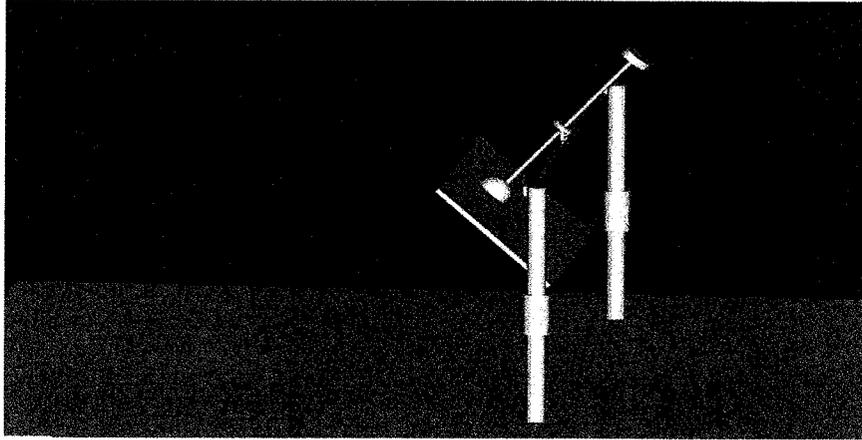
fluctuation de la vitesse autour de la moyenne u  $\rightarrow u'$

Force tractrice:

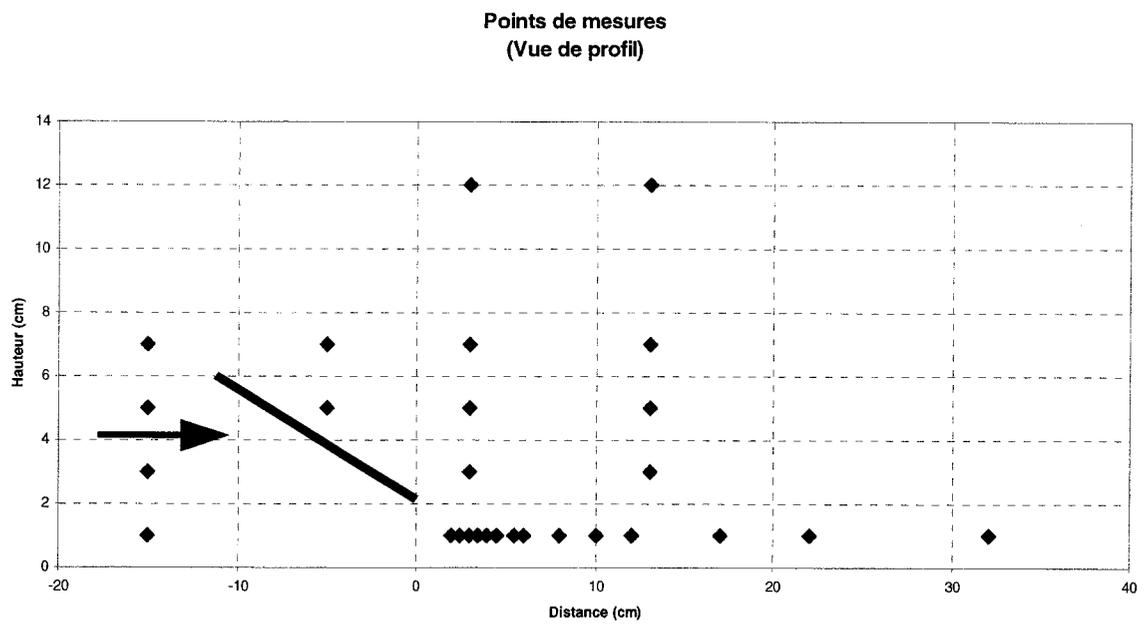
$$\tau = -\rho \cdot \overline{u'v'}$$

Calcul de l'énergie turbulente (RMS) :

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



**Figure A1-1** : Schéma du déflecteur utilisé pour les travaux de laboratoire.



**Figure A1-2** : Localisation des points d'échantillonnage par rapport au déflecteur (vue de profil)

## Résultats

La figure A1-3 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.

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 A1-1 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 1 893 %, 4 707 % et 4 379 %. La figure A1-3 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.

La figure A1-4 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 A1-2 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 %.

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 suggère 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.

### Force tractrice

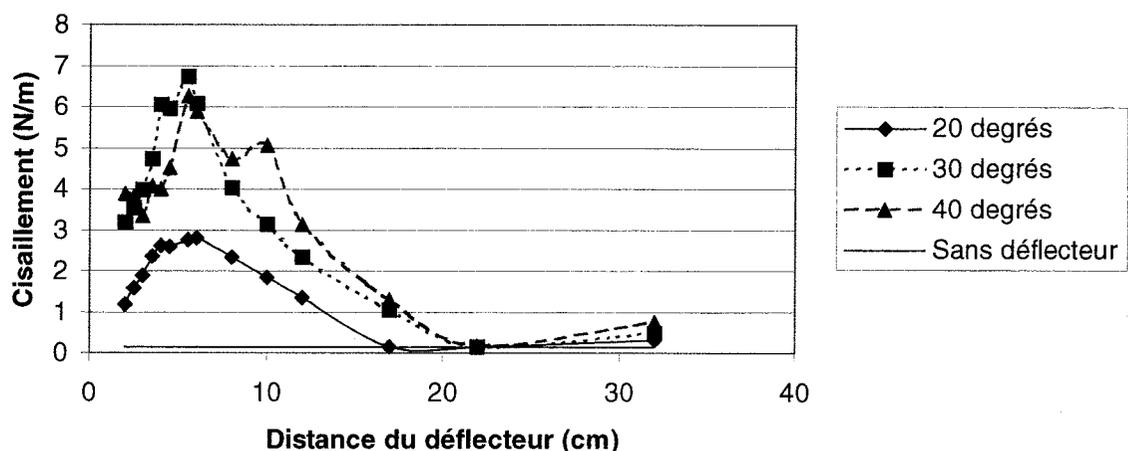


Figure A1-3 : Distribution spatiale de la force tractrice selon l'angle d'inclinaison et la distance du déflecteur.

### Intensité turbulente

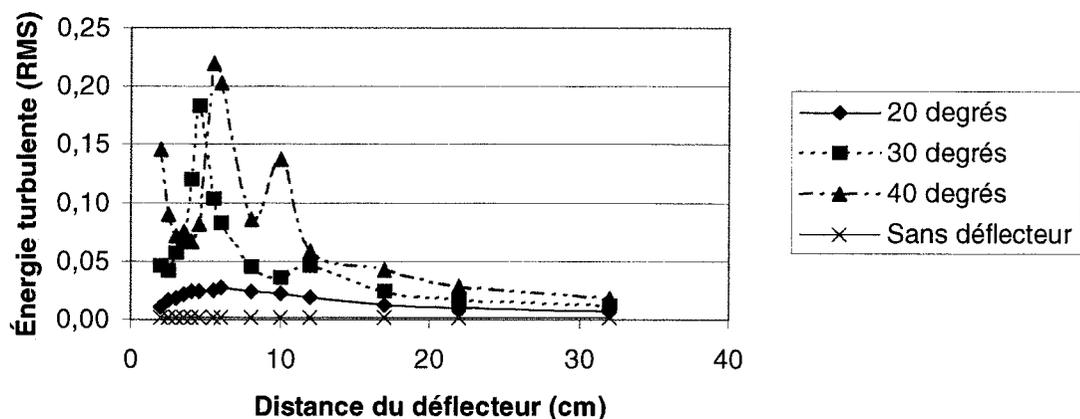


Figure A1-4 : Distribution spatiale de l'intensité turbulente (RMS) selon l'angle d'inclinaison et la distance du déflecteur.

**Tableau A1-1** : 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

**Tableau A1-2** : 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