
Méthodologie pour évaluer l'effet de l'installation
d'un ponceau sur le substrat des
frayères de l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*)

Louis Prévost
André P. Plamondon
Denis Lévesque

Université Laval
Faculté de foresterie et de géomatique
Centre de recherche en biologie forestière

pour le ministère des Ressources naturelles du Québec
la Société de la faune et des parcs du Québec
et la Fondation de la faune du Québec

**Méthodologie pour évaluer l'effet de l'installation d'un ponceau
sur le substrat des frayères de l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*)**

Louis Prévost, ing. forestier
André P. Plamondon, ing. forestier, Ph.D.
Denis Lévesque, M.Sc.

**Université Laval
Faculté de foresterie et de géomatique
Centre de recherche en biologie forestière**

pour le ministère des Ressources naturelles du Québec
la Société de la faune et des parcs du Québec
et la Fondation de la faune du Québec

Québec, février 2002

DEF-0176

Avertissement

La réalisation de ce travail a été subventionnée par le ministère des Ressources naturelles du Québec, la Société de la faune et des parcs du Québec et la Fondation de la faune du Québec. Les opinions et les recommandations exprimées dans le présent document n'engagent que les auteurs et non les organismes cités précédemment.

Renseignements

Maryse Dubé
Direction de l'environnement forestier
Ministère des Ressources naturelles du Québec
Téléphone : (418) 627-8646 poste
Courriel : maryse.dube@mrn.gouv.qc.ca

Diffusion

Direction des communications
Ministère des Ressources naturelles
Gouvernement du Québec
5700, 4^e Avenue Ouest, bureau B-302
Charlesbourg (Québec) G1H 6R1
Téléphone : (418) 627-8600 ou sans frais : 1-866-CITOYEN
1-866-248-6936

Courriel : service.citoyens@mrn.gouv.qc.ca
Site Internet : www.mrn.gouv.qc.ca

© Gouvernement du Québec
Dépôt légal – Bibliothèque nationale du Québec, 2001
ISBN : 2-550-38856-9
Code de diffusion : 2002-3043

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le ministère des Ressources naturelles du Québec, la Société de la faune et des parcs du Québec ainsi que la Fondation de la faune du Québec pour leur support financier. Le support logistique offert par les responsables de la Forêt Montmorency et les détenteurs de CAAF (Gestofor, Scierie Leduc et Abitibi Consolidated) a été fortement apprécié, particulièrement lors du transport des matériaux. Un remerciement spécial à M^{mes} Maryse Dubé et Stephanie Lachance ainsi qu'à MM. Pierre Larue, Gil Lambany et Ross Walsh pour leurs conseils durant la planification et l'exécution de l'étude et lors de la rédaction du rapport. Enfin, nos remerciements s'adressent à M^{mes} Christine Genest et Jacqueline Arsenault pour l'édition du rapport final.

Avant-propos

La présente étude a été réalisée de 1997 à 1999 pour le ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN), la Société de la faune et des parcs du Québec (FAPAQ) et la Fondation de la faune du Québec. Elle visait à mettre au point et à tester une méthode permettant d'évaluer l'impact de l'aménagement des ponceaux sur le lit des cours d'eau.

Les recommandations faites à la suite de cette étude ont été mises à profit par le MRN et la FAPAQ qui, à l'été 2000, ont entrepris de valider la disposition du Règlement sur les normes d'intervention dans les forêts du domaine public (RNI) (Gouvernement du Québec, 1996) interdisant la construction d'un ponceau dans les 50 m en amont d'une frayère dans le but d'éviter la destruction du milieu de reproduction des poissons. Cette nouvelle étude permettra d'évaluer l'impact de l'aménagement des ponceaux sur la qualité des sites de fraie de l'omble de fontaine en quantifiant les sédiments fins qui se déposent dans le gravier et en mesurant le taux de survie des œufs lors de l'émergence des alevins. Les résultats de cette nouvelle étude permettront de modifier, si nécessaire, la distance minimale de 50 m et de réviser les exigences du RNI liées à l'installation des ponceaux de manière à éliminer le plus possible l'apport de sédiments dans les cours d'eau.

Sommaire

L'installation annuelle d'environ 10 000 ouvrages pour traverser les cours d'eau des territoires forestiers du domaine de l'État québécois est régie par le Règlement sur les normes d'intervention en milieu forestier (RNI) du ministère des Ressources naturelles (MRN). Ce règlement vise à assurer l'intégrité du milieu aquatique en exigeant notamment une distance minimale de 50 m entre une frayère et un ponceau localisé en amont de cette dernière. Cette disposition du RNI ne pouvait être évaluée au moment de la mise sur pied, en 1995, du programme de suivi des normes par la Direction de l'environnement forestier du MRN parce que la méthodologie nécessaire n'avait pas été développée et validée. C'est pour combler cette carence que l'étude décrite dans ce rapport a été effectuée entre 1997 et 1999.

L'aménagement d'un ponceau peut favoriser l'érosion du lit et des berges du cours d'eau et introduire dans l'eau des particules qui seront ensuite transportées en suspension ou par charriage de fond. Ces changements physiques sont susceptibles de nuire aux organismes benthiques et d'altérer les lits de frai. La présente étude a donc été entreprise dans le but d'évaluer et de développer une méthodologie pour mesurer l'effet de l'implantation d'un ponceau sur la morphologie du cours d'eau et des frayères à omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*) en particulier. L'évaluation de la méthodologie visant à quantifier les effets appréhendés par l'installation de ponceaux a été effectuée dans huit cours d'eau de 2 à 4 m de largeur par le biais de six variables mesurées en amont et en aval du ponceau. Ces six variables sont l'érosion du lit, la déposition des sédiments, l'érosion maximale du lit, la granulométrie du substrat, la granulométrie de la surface du lit et un indice du charriage de fond. Parmi les méthodes évaluées pour mesurer ces variables, le profil transversal, la chaîne d'érosion permettant d'évaluer l'érosion maximale entre deux observations, la granulométrie de la surface du lit obtenue par le décompte des particules et la mesure d'un indice de charriage de fond obtenu par le captage des particules dans des récipients rigides à parois perforées sont les plus prometteuses.

L'érosion du lit, la déposition des sédiments ainsi que la variation de profondeur des bassins ont pu être évaluées avec une erreur de 10 mm par des mesures successives de la hauteur du lit en un point. L'erreur est de 4 mm pour la profondeur moyenne du profil transversal ou d'un bassin. L'érosion maximale du lit a été déterminée ponctuellement, avec une précision meilleure que 7 mm, à l'aide de chaînes ancrées dans le substrat. Les changements de topographie du lit étaient donc facilement mesurables.

La granulométrie du substrat prélevé dans le lit jusqu'à une profondeur de 24 cm avant la construction des ponceaux était très variable. En effet, la proportion de particules fines de diamètre inférieur à 5 mm, utilisée comme critère de qualité des frayères, avait un coefficient variant de 17 à 40 % en excluant le ruisseau sur substrat de sable.

Les changements de la granulométrie de la surface du lit ont été évalués par le décompte des particules. La proportion de particules fines à la surface du lit, déterminée par le décompte de 100 particules dans cinq biefs non affectés par l'installation de ponceaux, a varié en moyenne de 21 % dans un intervalle de 11 mois.

Durant cette même période, un indice du charriage de fond a été obtenu par la mesure de la quantité de sédiments fins captés dans des lits de gravier expérimental placés au-dessus de sacs collecteurs enfouis dans le substrat à frayère. Les quatre sacs collecteurs installés dans une section non perturbée dans cinq ruisseaux ont capté en moyenne 20 kg m^{-2} de particules fines (diamètre < 2 cm) en 11 mois. Le coefficient de variation moyen de 49 % obtenu sur sept groupes de quatre récipients rigides est similaire à celui des sacs.

La variabilité naturelle de la granulométrie de la strate supérieure du lit des cours d'eau à l'étude, le transport normal et incessant des particules fines et le faible nombre d'échantillons qu'il est possible de

prélever sans trop perturber le milieu, font en sorte que le simple prélèvement d'échantillons permet seulement la détection des modifications majeures des sites de frai par l'érosion ou la sédimentation. Seule une technique d'échantillonnage qui permet de vérifier les changements au même endroit dans le gravier de frai peut détecter des modifications plus subtiles. Le captage de particules fines dans une section amont du ponceau et dans des sections aval permet d'évaluer la variabilité naturelle dans le temps et l'effet de l'installation du ponceau. Ainsi, l'accumulation des particules fines dans des lits de gravier expérimental permet de détecter des changements de qualité des sites de frai qui n'auraient pu être observés par le prélèvement de carottes ou par le décompte des particules de la surface du lit.

Référence : Prévost, L., A.P. Plamondon et D. Lévesque, 2002. *Méthodologie pour évaluer l'effet de l'installation d'un ponceau sur le substrat des frayères de l'omble de fontaine (Salvelinus fontinalis)*, Québec, Université Laval, Faculté de foresterie, Centre de recherche en biologie forestière pour le ministère des Ressources naturelles du Québec, la Société de la faune et des parcs du Québec et la Fondation de la faune du Québec, code de diffusion 2002-3043, 37 p.

Table des matières

| | |
|---|-----|
| Remerciements | iii |
| Avant-propos | v |
| Sommaire | vii |
| Table des matière | ix |
| Liste des tableaux | xi |
| Liste des figures | xi |
| Introduction | 1 |
| 1. Aire d'étude | 3 |
| 2. Approche expérimentale | 5 |
| 3 Paramètres et méthodes de mesure | 7 |
| 3.1 Profil longitudinal | 7 |
| 3.2 Profil transversal | 7 |
| 3.2.1 Description | 7 |
| 3.2.2 Méthode de mesure | 8 |
| 3.2.3 Erreurs de mesure..... | 8 |
| 3.3 Volume d'un bassin | 10 |
| 3.3.1 Description | 10 |
| 3.3.2 Méthode de mesure | 11 |
| 3.3.3 Erreurs de mesure..... | 11 |
| 3.4 Granulométrie du substrat..... | 12 |
| 3.4.1 Description | 12 |
| 3.4.2 Méthode de mesure | 12 |
| 3.4.3 Efficacité de l'échantillonnage | 14 |
| 3.5 Granulométrie de la surface du lit..... | 16 |
| 3.5.1 Description | 16 |
| 3.5.2 Méthode de mesure | 18 |
| 3.5.3 Erreurs de mesure..... | 18 |
| 3.6 Indice du charriage de fond..... | 20 |
| 3.6.1 Description | 20 |
| 3.6.2 Méthode de mesure | 20 |
| 3.6.3 Efficacité de l'échantillonnage..... | 23 |
| 3.7 Érosion maximale du lit | 26 |
| Conclusion..... | 27 |
| Annexe A Description des unités de paysages régionaux et localisation des cours d'eau dans les systèmes de classification des unités de paysages régionaux (Robitaille et Saucier, 1998) et écologiques du territoire (Grondin <i>et al.</i> , 1996)..... | 29 |
| Annexe B Caractéristiques topographiques des ruisseaux à l'étude | 30 |
| Annexe C Date d'installation des dispositifs, de construction des ponceaux et de récoltes des données..... | 31 |
| Bibliographie..... | 33 |

Liste des tableaux

| | | |
|------------|--|----|
| Tableau 1 | Précision de la mesure de profondeur du profil transversal à un niveau de confiance de 95 % | 9 |
| Tableau 2 | Avantages et désavantages de l'échantillonneur McNeil et de la congélation pour évaluer la granulométrie du substrat..... | 13 |
| Tableau 3 | Caractéristiques du substrat des ruisseaux à l'étude avant la construction des ponceaux..... | 15 |
| Tableau 4 | Proportion des particules fines (< 5 mm) par couche de profondeur pour l'ensemble des carottes congelées extraites pour chaque ruisseau..... | 16 |
| Tableau 5 | Diamètre médian des particules par couche de profondeur pour l'ensemble des carottes congelées extraites pour chaque ruisseau..... | 16 |
| Tableau 6 | Pourcentage de particules fines (< 5 mm) composant la surface du lit selon le nombre de particules prélevées..... | 19 |
| Tableau 7 | Pourcentage de particules fines (< 5 mm) composant la surface du lit durant un intervalle de 1 an dans des biefs non affectés par l'installation de ponceaux..... | 19 |
| Tableau 8 | Avantages et désavantages des indices de mesure du déplacement des particules à la surface du lit (charriage de fond) et de la pénétration des particules fines dans le gravier..... | 23 |
| Tableau 9 | Particules fines (< 5 mm) captées par le gravier expérimental des sacs collecteurs et des contenants rigides dans les sections non traitées..... | 25 |
| Tableau 10 | Ratio de la masse des particules fines (< 5 mm) sur la masse du gravier expérimental pour les tubes congelés des sections non traitées | 26 |

Liste des figures

| | | |
|----------|---|----|
| Figure 1 | Localisation des cours d'eau étudiés en 1997, 1998 et 1999 | 4 |
| Figure 2 | Dispositif expérimental et localisation des biefs (M, A, B et C) dans un cours d'eau | 6 |
| Figure 3 | Profil longitudinal et faciès d'écoulement..... | 7 |
| Figure 4 | Profil transversal et dispositif de mesure..... | 8 |
| Figure 5 | Dispositifs de mesure de la profondeur des bassins | 11 |
| Figure 6 | Gravelomètre composé d'une plaque d'acier inoxydable de 1,6 mm d'épaisseur perforée de trous carrés dont la longueur d'un côté est donnée en mm | 18 |
| Figure 7 | Contenant rigide à parois perforées enfoui dans le lit | 21 |
| Figure 8 | Dispositif de mesure du charriage de fond comprenant un sac collecteur et un tube à congélation enfouis dans le gravier expérimental..... | 21 |

Introduction

L'établissement du réseau routier forestier entraîne l'installation annuelle d'environ 10 000 ouvrages pour traverser les cours d'eau qui sillonnent les terres du domaine de l'État québécois. L'aménagement de ces ouvrages est susceptible de favoriser l'érosion du lit et des berges des cours d'eau et d'introduire dans l'eau des particules qui seront ensuite transportées en suspension ou par charriage de fond. La déposition de ces particules sur le lit des cours d'eau et des frayères peut être dommageable pour les organismes benthiques et la reproduction de certaines espèces de poissons. Afin d'assurer l'intégrité du milieu aquatique, le Règlement sur les normes d'intervention en milieu forestier dans les forêts du domaine public (RNI) du ministère des Ressources naturelles (MRN) (Gouvernement du Québec, 1996) prévoit des dispositions spécifiques à l'installation de ponceaux. Ces dispositions visent notamment la stabilisation des remblais et déblais, l'évacuation des fossés vers le parterre forestier et le respect d'une distance d'au moins 50 m entre un ponceau et une frayère localisée en aval. Depuis 1995, le MRN a mis en place un programme de suivi permettant d'évaluer l'efficacité des normes relatives aux ponceaux. Cependant, l'efficacité de la norme de 50 m en ce qui a trait à la protection des sites de reproduction des poissons n'a pas été évaluée.

La présente étude a pour objectif d'évaluer et de développer une méthodologie visant à mesurer l'effet de l'implantation d'un ponceau sur la morphologie du cours d'eau et en particulier des frayères à omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*). La documentation scientifique, particulièrement celle qui traite de l'impact des activités forestières sur la morphologie des cours d'eau, a été révisée afin d'en extraire les méthodes d'investigation les plus prometteuses. Ces dernières ont ensuite fait l'objet d'une évaluation sur le terrain.

1. Aire d'étude

L'aire d'étude a été restreinte au territoire à vocation forestière du bouclier précambrien entre le lac Batiscan au sud-ouest et le lac Itomamo au nord-est de la rivière Saguenay (Figure 1). Chaque cours d'eau a été nommé d'après le lac ou la rivière qui le reçoit, soit : lac Batiscan (BT) ; Forêt Montmorency (FM) ; lac Jobin (JB) ; Rivière-Éternité (ET) ; lac English (EG) ; chemin 18 (18) ; lac Raymond (RM) ; lac Itomamo (IT). L'objet de l'étude étant le développement d'une méthodologie, il était important de comparer des cours d'eau influencés par un seul type de géologie (cristallin et composé de roches ignées et métamorphiques i.e. gneiss) et de dépôts de surface (till indifférencié épais ou mince) (Robitaille et Saucier, 1998). En plus de ce critère, les cours d'eau ont été choisis en considérant (i) la construction prévue d'un ponceau durant la période estivale, (ii) la présence de frayères potentielles ou actives distribuées dans la section de 200 m en aval et 50 m en amont de l'emplacement du ponceau et (iii) l'homogénéité des caractéristiques hydrauliques du lit dans cette section de 250 m. Le climat, les unités de paysages, les domaines bioclimatiques et les caractéristiques topographiques des zones d'étude sont présentés à l'Annexe A.

Les aires des bassins versants des ruisseaux étudiés varient entre 96 et 830 ha. Le débit de récurrence de 10 ans (Q_{10}), calculé à l'endroit de la traversée selon la méthode rationnelle (Gouvernement du Québec, 1996), varie de 0,9 à 8,8 $m^3 \cdot s^{-1}$. La largeur et la profondeur de pleins bords varient respectivement de 2,30 à 4,77 m et de 0,19 à 0,50 m. La pente moyenne du lit des sections d'étude se situe entre 0,03 % et 3,5 %. Le substrat permet de distinguer trois groupes de ruisseaux, soit BT-EG-ET-FM-18, IT-JB et RM, dont les pourcentages de particules fines sous 5 mm de diamètre se situent respectivement autour de 30 % (gravier), 50 % (gravier fin) et 100 % (sable). Ce regroupement, basé uniquement sur le substrat, correspond au classement de Dulude et Valières (1992). Une classification exhaustive, comme celle de Rosgen (1996) et de Montgomery et Buffington (1993), tenant compte de plusieurs facteurs, n'a pas été adaptée aux réalités du Québec. Des informations spécifiques à chaque ruisseau sont présentées à l'Annexe B.

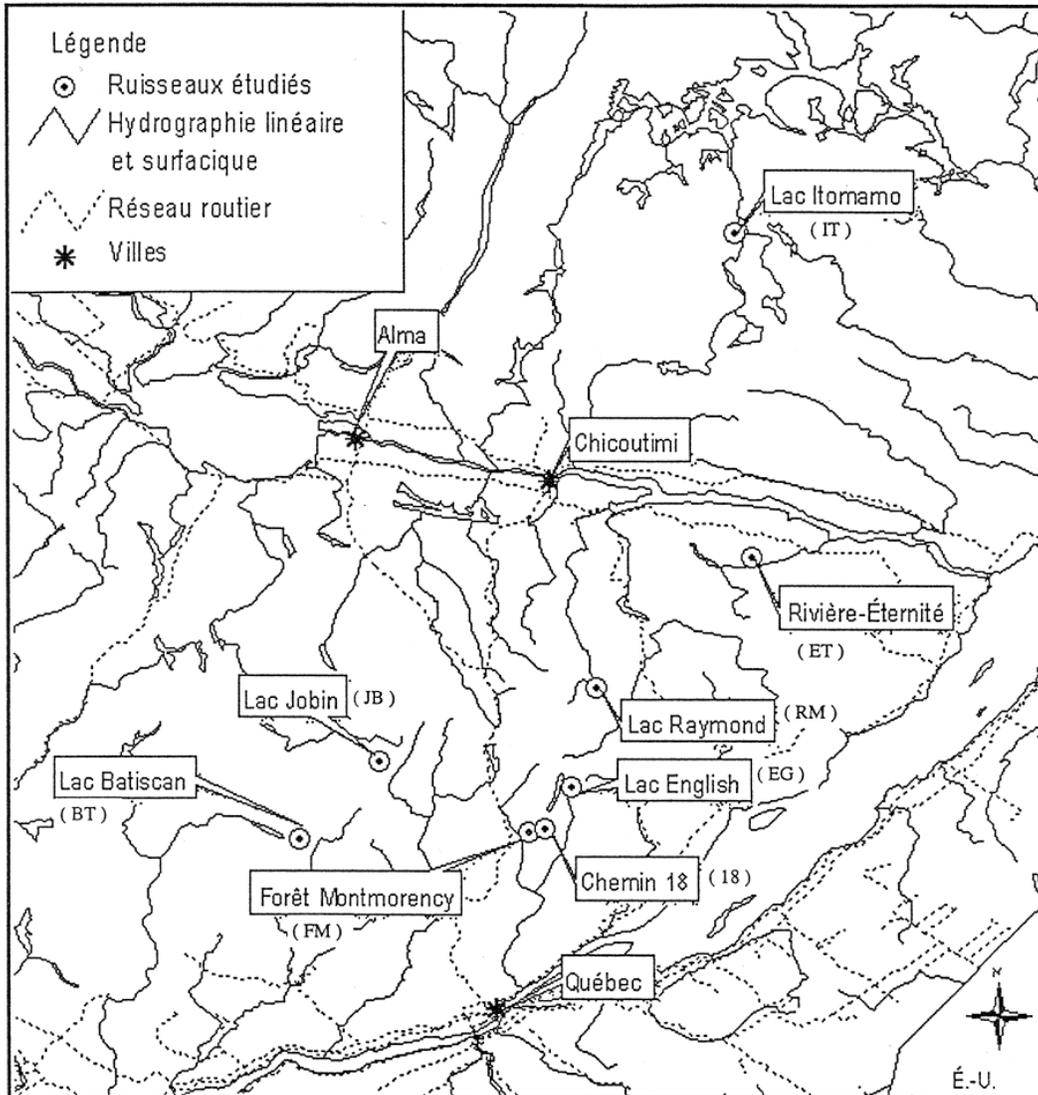


Figure 1 Localisation des cours d'eau étudiés en 1997, 1998 et 1999

2. Approche expérimentale

Dès 1980, Anderson et Bryant soulignaient le besoin d'étudier l'effet des ponceaux sur le milieu aquatique. Spillios et Rothwell (1998) soulignent que les impacts d'ouvrages installés selon les règles d'opération des industries forestières et minières de l'Alberta, ont rarement ou jamais été évalués. Ainsi, très peu d'études de ce type ont fait l'objet de publications scientifiques. Adams et Hook (1993) ont utilisé le protocole d'évaluation biologique rapide du *US Environmental Protection Agency* (EPA) pour déterminer, entre autres, la disponibilité en habitats d'invertébrés et le degré d'enclassement des particules grossières en amont et en aval d'ouvrages construits pour traverser un cours d'eau. Certains facteurs, dont l'intermittence du débit et l'absence d'utilisation de géotextile pour la stabilisation des talus entre les berges ne permettent pas d'extrapoler leurs résultats à nos conditions. Spillios et Rothwell (1998) ont expérimenté des méthodes d'échantillonnage par congélation. Il n'y a encore aucune méthodologie validée pour évaluer l'effet de la pose du tuyau puis de la présence permanente du ponceau sur les frayères. Toutefois, diverses études ont été réalisées dans le but de mesurer les changements géomorphologiques des cours d'eau, qu'ils soient d'origines naturelle ou anthropique.

Un changement de la topographie du lit par la déposition de sédiments ou l'affouillement peut modifier les courants et la force locale appliquée sur les particules du lit (Rosgen, 1996). Ceci a pour conséquence de modifier la granulométrie du substrat en surface et en profondeur. Ces modifications peuvent causer la destruction des colonies d'insectes et d'autres invertébrés, sources de nourriture pour les poissons (Waters, 1995). L'altération du lit de fraie est l'élément le plus susceptible d'affecter la faune aquatique. En effet, durant la période d'incubation, les œufs sont vulnérables à l'affouillement ou à la déposition de sédiments fins. Les particules fines insérées dans les interstices du gravier réduisent l'oxygénation des œufs et le nombre d'alevins pouvant émerger du gravier (Lisle, 1989). Ces changements peuvent se produire naturellement ou en réponse à l'aménagement d'un ponceau (Lisle, 1989) et doivent, par conséquent, être pris en compte par la méthode d'évaluation.

En milieu naturel, la topographie du lit et la granulométrie du substrat sont en équilibre dynamique avec le débit et la charge sédimentaire (Dunne et Leopold, 1978) et varient considérablement dans le temps (Adams et Beschta, 1980 ; Scrivener et Brownlee, 1989). Si le lit est perturbé par une intervention quelconque, il faut donc utiliser une méthode d'échantillonnage qui rend possible la discrimination des variations naturelles et des effets de l'intervention. En hydrologie, une approche fréquemment utilisée consiste à prendre des mesures dans des stations témoins qui ne subiront aucune modification intentionnelle et dans des stations destinées à être traitées. La période avant le traitement, dite de calibrage, permet d'estimer la variabilité naturelle entre les deux groupes de stations. Il devient alors possible, après l'intervention, de discerner avec un certain niveau de confiance, les changements qui sont attribuables aux interventions (Hewlett et Pienaar, 1973). Toutefois, les contraintes temporelles et financières ne permettent pas toujours d'appliquer rigoureusement cette approche. Ainsi, Macdonald *et al.* (1997) ont pris des mesures simultanées dans un grand nombre de stations en Idaho (soit 114 sections de cours d'eau) réparties entre les zones coupées et non coupées, compensant ainsi l'absence d'une période de calibrage par l'obtention d'un plus grand nombre de mesures pour diminuer l'incertitude sur la variabilité naturelle intergroupe. En Colombie-Britannique, Hartman et Scrivener (1990) ont évalué l'effet de la coupe forestière dans une seule section de cours d'eau en utilisant une section témoin et une période de calibrage avant la coupe.

Dans la présente étude, une approche avec sites témoins sans période de calibrage a été retenue. Le dispositif expérimental comprend un bief témoin en amont du ponceau et trois biefs en aval qui ont servi à mesurer les effets. Une mesure de référence a été prise avant l'aménagement du ponceau puis l'effet du traitement a été mesuré un mois et un an après la construction de l'ouvrage. Les dates de récolte des données sont indiquées à l'Annexe C. Ainsi, sont distribués sur une section d'environ 200 m de longueur,

le bief (M) amont (environ 20 m), l'emplacement du ponceau (25 m) et les biefs A, B et C en aval du ponceau (Figure 2). La majorité des ponceaux ne dépassant pas 12 m de longueur, l'espace réservé a été jugé suffisant pour tenir compte d'un ajustement de la localisation lors de la pose du tuyau et des travaux de stabilisation à effectuer de chaque côté du ponceau. Le bief A (0-20 m) s'étend de la sortie du ponceau sur environ 20 m de longueur. Les biefs B et C s'étendent sur 10 m de longueur autour de 50 et 150 m en aval du ponceau. La localisation précise du bief en amont et des biefs localisés autour de 50 et 150 m en aval est choisie de façon à ce que leurs caractéristiques hydrauliques soient similaires à celles du bief 0-20 m en aval.

Au départ, un profil longitudinal a été établi dans le but de décrire globalement les sections des cours d'eau à l'étude. Les effets appréhendés des ponceaux sur les ruisseaux ont été évalués par le biais de six caractéristiques du lit : profil transversal, volume des bassins, érosion maximale du lit, granulométrie du substrat, granulométrie de la surface du lit, indice de charriage de fond. Il a été supposé que le suivi de ces caractéristiques dans le temps et l'espace permette de mesurer les changements dus à l'érosion des berges et à l'affouillement du lit, à l'apport et au transport des sédiments et à la déposition des particules sur le lit et dans le substrat.

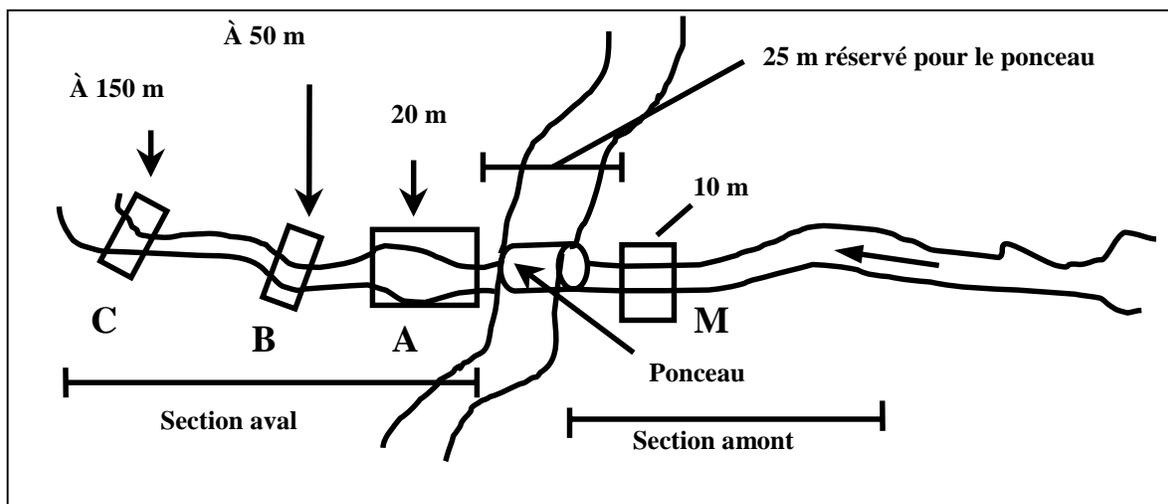


Figure 2 Dispositif expérimental et localisation des biefs (M, A, B et C) dans un cours d'eau

3. Paramètres et méthodes de mesure

3.1 Profil longitudinal

Le profil longitudinal d'un cours d'eau est une vue en coupe, parallèle au sens de l'écoulement, de l'élévation mesurée dans la partie la plus profonde du lit appelée thalweg (Figure 3). La première approche décrite par Rosgen (1996) pour obtenir un profil d'élévation du lit est l'utilisation d'une mire (règle d'arpentage) avec un niveau ou une station totale qui mesure aussi la distance entre les points d'élévation du thalweg. L'utilisation d'un ruban tendu à l'horizontale à partir duquel l'élévation du sol est mesurée est une deuxième approche qui requiert peu d'équipement. Cependant, elle n'est pas pratique pour établir le profil longitudinal sur une longue distance, surtout lorsque le thalweg est sinueux. C'est pour cette raison qu'une station totale a été utilisée. Les points de mesures ont été localisés aux brisures de pente dans le thalweg et dans les dépressions afin de limiter le temps requis pour la prise des données sur le terrain à 2 jours/personne par ruisseau. Cette technique permet de représenter assez fidèlement le profil complet au moyen d'une interpolation linéaire entre les points. La mesure du profil longitudinal a permis de localiser les faciès d'écoulement et les sites d'échantillonnage et de calculer la pente du lit des biefs à l'étude.

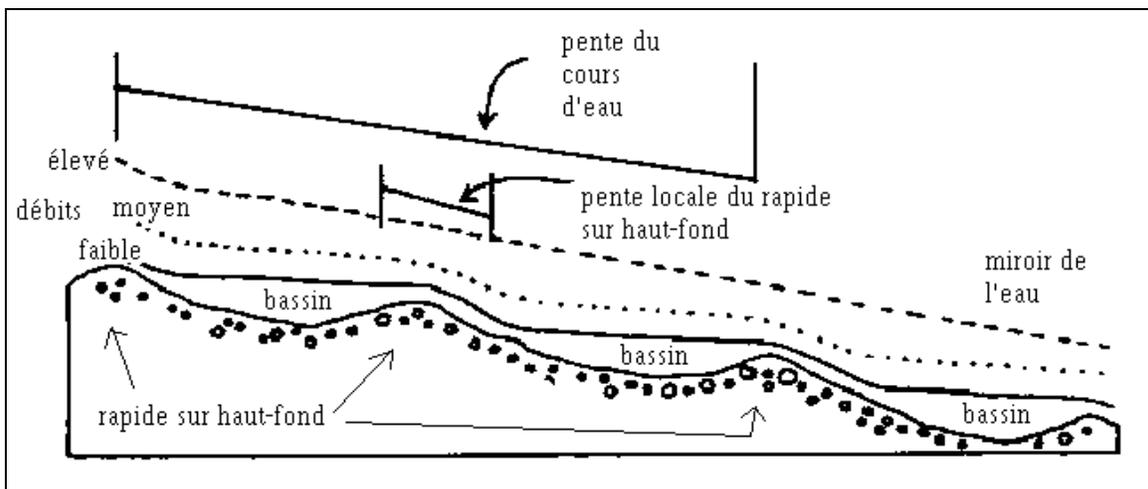


Figure 3 Profil longitudinal et faciès d'écoulement

3.2 Profil transversal

3.2.1 Description

Le profil transversal est une vue en coupe perpendiculaire à la direction de l'écoulement, de l'élévation du lit, des berges et de la zone riveraine si désiré (Figure 4). La forme du lit obtenue par le profil transversal sert à classer les cours d'eau (Montgomery et Buffington, 1993 dans Macdonald *et al.*, 1997 ; Rosgen, 1996) dans l'une des catégories suivantes : rectangulaire, trapézoïdale, en V, convexe, en bol, en terrasse ou autres (Gordon *et al.*, 1992). Ce profil est aussi utilisé pour évaluer l'érosion, la déposition des particules et le changement de la forme du lit (Rosgen, 1996 ; Macdonald *et al.*, 1997), en comparant les profondeurs mesurées sur une période allant de quelques jours jusqu'à plusieurs décennies (Leopold, 1973 dans Deenihan et Lisle, 1988). Ces perturbations peuvent être causées par l'implantation des ponceaux. Par conséquent, elles sont susceptibles d'être détectées par des mesures successives de profils transversaux. Cependant, cette méthode ne permet pas de connaître la séquence des changements qui se

sont produits entre les deux mesures. La sensibilité des profils pour détecter les changements dépend de la variabilité et du nombre de mesures de profondeur effectuées (Olson-Rutz et Marlow, 1992).

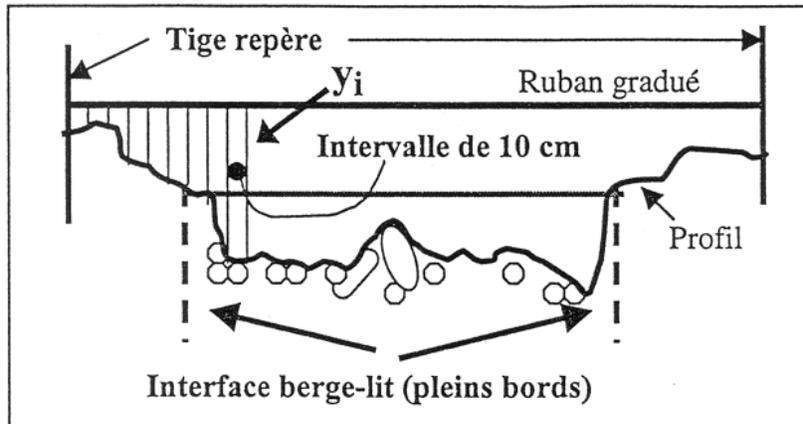


Figure 4 Profil transversal et dispositif de mesure

3.2.2 Méthode de mesure

Puisque les cours d'eau étudiés ne dépassent pas 5 m de largeur, un simple ruban tendu entre deux tiges de métal espacées de moins de 8 m (Olson-Rutz et Marlow, 1992 ; Rosgen 1996) permet de mesurer les profils transversaux (Figure 4). Des tiges d'acier de 13 mm de diamètre et de 122 cm de longueur, enfoncées de 75 à 100 cm dans le sol de la berge, servent de repères pour les mesures successives. Une tension constante a été maintenue sur le ruban en suspendant à une extrémité un contenant rempli d'eau. Cette approche simplifie la correction pour la courbure du ruban (Ray et Megahan, 1979), car la tension demeure constante et identique pour toutes les mesures. La profondeur du lit par rapport au ruban a été mesurée à tous les 10 cm à l'aide d'un tube d'aluminium gradué en millimètres. Ce tube carré de 5 cm de côté a été utilisé afin de limiter l'enfoncement dans le lit et d'assurer une bonne rigidité par rapport au courant d'eau. La nature du lit sous le pied du tube a aussi été notée afin de prendre les mesures subséquentes au même endroit. Au point de mesure, le lit peut être composé de sable ou de gravier fin, d'une pierre (dessus ou côté) ou d'une pièce de bois. Tel que recommandé par Rosgen (1996), la localisation des berges et du thalweg ainsi que les niveaux d'eau et de pleins bords ont été notés au moment de la mesure du profil. Pour un ruisseau, l'installation des repères et la mesure de 40 profils transversaux a requis en moyenne 2,5 jours/personne par ruisseau. Il fallait 20 minutes à deux observateurs pour mesurer chaque profil transversal, ce qui correspond aux 30 minutes estimées par Lisle et Eads (1991) pour des profils d'une largeur d'environ 10 m.

3.2.3 Erreurs de mesure

La profondeur mesurée est la différence d'élévation entre le ruban tendu entre deux tiges et la surface du sol. La précision de la mesure de profondeur est de 10 mm (Tableau 1). D'une mesure à l'autre, la variation du positionnement du tube carré sur le lit entraîne cependant une perte importante de reproductibilité de la lecture de profondeur. Pour évaluer la reproductibilité de la mesure sous diverses conditions, quatre profils transversaux ont été mesurés à cinq reprises le même jour. La profondeur a été mesurée à tous les 10 cm et un écart-type a été calculé pour chaque point. Les écarts-types moyens (ETM) ont ensuite été calculés pour chaque catégorie de point de mesure (berge, interface berge-lit, lit sur le substrat et thalweg). Un calcul identique a été fait pour les distances du thalweg et de l'interface berge-lit par rapport à la tige repère. La reproductibilité de la mesure pour chaque catégorie de points et type de mesure a été estimée à deux fois ETM. Si on suppose une distribution normale des écarts de mesure en un

point, l'écart entre chaque mesure et la moyenne a 95 % de chance d'être inférieure à deux fois ETM. Puisque les profils transversaux n'ont été mesurés qu'une seule fois à chaque étape temporelle, on ne dispose pas de données pour estimer la variance à chaque point. Par conséquent, il faut utiliser la reproductibilité de la catégorie du point comme erreur de mesure.

Tableau 1 Précision de la mesure de profondeur du profil transversal à un niveau de confiance de 95 %

| Catégorie de points | N | Écart-type moyen (mm) | CV ^a (%) | Précision de la mesure (mm) |
|--|----|-----------------------|---------------------|-----------------------------|
| Localisation du thalweg | 4 | 14,8 | 81,2 | 30 ^b |
| Profondeur du thalweg | 4 | 4,1 | 48,4 | 8 ^b |
| Localisation de l'interface berge-lit | 8 | 4,7 | 115,7 | 9 ^b |
| Profondeur de l'interface berge-lit | 8 | 6,8 | 63,7 | 14 ^b |
| Longueur du ruban | 4 | 0,0 | 0,0 | négligeable |
| Hauteur de la tige repère | 8 | 1,6 | 86,3 | 3 |
| Profondeur dessus d'une roche | 4 | 8,9 | 133,5 | 18 |
| Profondeur côté d'une roche | 5 | 11,5 | 41,4 | 23 |
| Profondeur sur un bois | 6 | 15,9 | 166,1 | 32 |
| Profondeur du lit sur substrat | 61 | 5,1 | 89,7 | 10 |
| Profondeur moyenne du lit sur substrat | 4 | 2,0 | 28,4 | 4 |
| <hr/> | | | | |
| Profondeur du lit sur substrat | | | | |
| Observateur 1 | 15 | 5,3 | 37,6 | 11 |
| Observateur 2 | 15 | 6,1 | 109,8 | 12 |
| <hr/> | | | | |
| Profondeur moyenne du lit | | | | |
| Observateur 1 | 1 | - | 0,4 | 6 |
| Observateur 2 | 1 | - | 0,2 | 2 |

a. CV : coefficient de variation

b. Pour un observateur unique

Les erreurs estimées (Tableau 1) indiquent que la différence de profondeur doit dépasser 10 mm pour les points des catégories « substrat du lit » ou « thalweg » et 14 mm pour ceux de « l'interface berge-lit » avant de conclure à un changement de profondeur entre deux mesures successives. L'erreur de mesure est de 32, 23 et 18 mm respectivement pour les mesures de profondeur prises sur « bois », « côté d'une roche » ou « dessus d'une roche ». L'erreur la plus grande sur des mesures prises sur « bois » peut être due au déplacement, à la flexibilité ou à l'inclinaison de ce type de substrat. L'erreur est moindre pour la catégorie « dessus d'une roche », car elle est plus facile à identifier, la surface étant près de l'horizontale. L'erreur reliée à la mesure de la hauteur de la tige repère est de 3 mm et est causée principalement par les mousses au sol qui offrent un appui compressible au tube gradué. La courbure du ruban étendu à chaque mesure, sous une même tension et sur une même distance entre les deux repères, contribue très peu à l'erreur des mesures de hauteur.

Pour le même profil transversal, l'erreur de mesure pour la catégorie « substrat du lit » attribuable à l'observateur 1 est de 11 mm (CV de 38 %) et, pour l'observateur 2, de 12 mm (CV de 110 %). Ces erreurs sont similaires, mais les CV démontrent que la variation des mesures est beaucoup plus grande pour l'un des deux observateurs. Ainsi, pour détecter un effet du traitement, il faudra que la différence de profondeur atteigne 12 mm (probabilité de 95 %) lorsque les mesures seront effectuées par deux observateurs. Puisque la localisation moyenne du thalweg diffère de 90 mm entre les deux observateurs

tandis que la profondeur moyenne diffère de 25 mm, il est important de noter que les erreurs de mesure du thalweg indiquées au tableau 1 ne sont valides que pour un observateur unique. Un décalage supérieur à 30 mm doit être observé avant de conclure à un déplacement du thalweg.

La localisation de l'interface berge-lit basée sur un seul critère, soit la limite de la végétation, peut varier jusqu'à 9 mm lors de mesures successives par rapport à la tige repère. La précision de la mesure de la profondeur de l'interface berge-lit est de 14 mm, soit légèrement plus faible que celle du lit sur substrat. Cependant, un écart de près de 50 mm a été observé entre les moyennes des distances de l'interface berge-lit lues par les deux observateurs. Cet écart atteint 70 mm pour les profondeurs moyennes. Ces grandes variations s'expliquent par la difficulté d'interprétation due au fait que cette limite n'est pas rectiligne dans l'axe du cours d'eau, que la végétation est souvent discontinue et qu'il y a une transition entre la végétation vivante et celle en apparence morte. La berge étant généralement abrupte, une petite variation dans l'interprétation de la distance de cette limite par rapport au repère entraîne un grand changement dans la mesure de la profondeur du début de la berge. Ce qui diminue aussi la précision des mesures prises par un ou deux observateurs est la différence de pression exercée sur la végétation par la règle à mesurer ainsi que la croissance de la végétation entre deux mesures. La profondeur moyenne de la berge est, par conséquent, plus variable que celle du lit.

L'érosion des berges étant peu fréquente dans les petits cours d'eau à l'étude, il est inutile d'évaluer le niveau de la berge à chaque visite s'il n'y a pas eu de perturbations évidentes. Par conséquent, il est recommandé de vérifier la localisation de l'interface berge-lit lors des visites subséquentes et d'éviter, si la berge n'a pas subi d'érosion, d'en mesurer la profondeur. La profondeur moyenne des deux interfaces berge-lit observée lors de la première lecture est un indice du niveau de pleins bords. Cet indice sert à décrire globalement la section du cours d'eau. Ce dernier n'est pas suffisant pour déterminer les relations hydrauliques entre le débit, la vitesse et l'aire d'écoulement au niveau de pleins bords (Mailloux *et al.*, 2000).

Ainsi, la mesure de cinq profils transversaux dans un bief témoin en amont permet, par comparaison avec la profondeur du lit dans cinq profils ou plus en aval du ponceau, de détecter les changements de la topographie du lit attribuable à l'aménagement de cet ouvrage.

3.3 Volume d'un bassin

3.3.1 Description

Les effets de l'implantation des ponceaux sur la forme du lit peuvent aussi être mesurés en suivant l'évolution temporelle de la forme et du volume d'un bassin. Le bassin est une zone d'eau profonde à écoulement lent (Beschta et Platts, 1986 ; Boudreault, 1984 ; Grant *et al.*, 1990 ; Keller, 1971 ; Keller et Melhorn, 1978 ; Yang, 1971). Le bassin a été identifié selon les critères proposés par Macdonald *et al.* (1997) : (i) le profil du fond dans la direction de l'écoulement est concave (ii) la profondeur d'eau minimale en période d'étiage est d'au moins 10 cm et (iii) la zone d'eau profonde occupe au moins la moitié de la largeur du cours d'eau. En plus d'être une composante importante de l'habitat des poissons, le bassin est le faciès d'écoulement le plus sensible aux perturbations du territoire avoisinant (Bjornn *et al.*, 1977 ; Lisle, 1982 dans Lisle, 1987). L'écoulement lent favorise la déposition des sédiments dans le bassin, surtout lorsque la quantité de particules transportées est augmentée par rapport à son niveau naturel.

3.3.2 Méthode de mesure

La profondeur moyenne et le volume du bassin s'obtiennent généralement en établissant des profils du niveau du lit dans les directions longitudinale ou transversale du bassin. Pour minimiser le nombre de repères permanents, une première variante a consisté à localiser les points de mesure d'élévation du lit en coordonnées polaires à partir d'une tige de référence unique plantée au milieu du bassin. Les points d'échantillonnage étaient distribués à tous les 25 cm le long de rayons orientés à tous les 30° autour de ce point (Figure 5a). Le miroir de l'eau, présumément horizontal, servait de niveau de référence. En second lieu, la disposition en losange de quatre repères a permis de définir un axe principal dans le sens de l'écoulement entre les repères amont et aval, et un axe secondaire perpendiculaire et au centre du précédent (Figure 5b). En ajoutant les quatre côtés du losange, ce dispositif permet de délimiter six segments de droite le long desquels les profils de profondeur ont été mesurés à tous les 10 cm. Cette deuxième approche suppose aussi que le miroir de l'eau est horizontal. Pour décrire et évaluer la répartition spatiale des changements à l'intérieur du bassin, les profils de profondeur peuvent être regroupés de façon à former quatre parties de bassin : aval et amont ou rive droite et rive gauche.

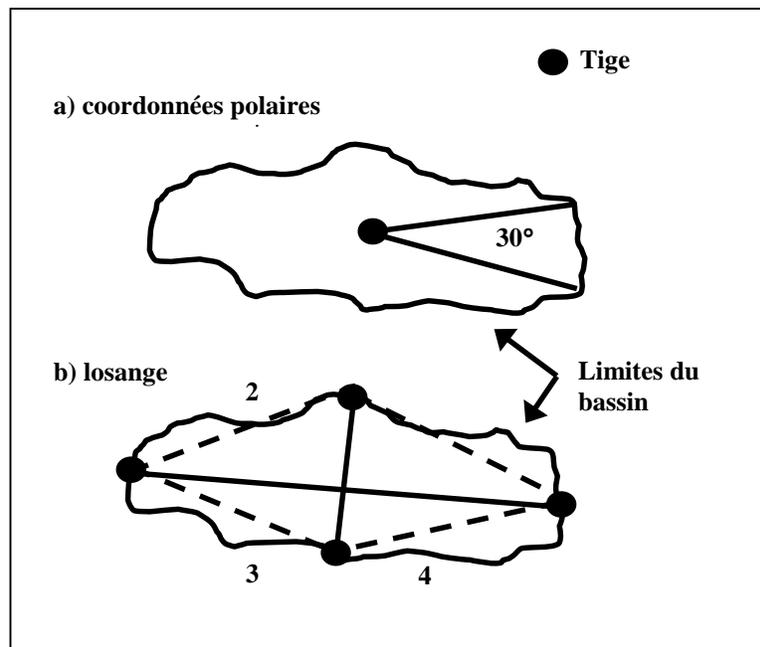


Figure 5 Dispositifs de mesure de la profondeur des bassins

3.3.3 Erreurs de mesure

La méthode de repérage en coordonnées polaires s'est avérée peu précise (Figure 5a). Cette approche, par rapport à celle du losange, augmentait le piétinement tout en introduisant des erreurs associées à l'orientation des rayons. La technique du losange (Figure 5b) est entachée d'une erreur similaire à celle obtenue pour le lit des profils transversaux (Tableau 1). La distribution des points de mesure ne permet pas de calculer le volume avec précision, mais les mesures subséquentes étant effectuées aux mêmes points, leur nombre est suffisant pour évaluer les changements moyens de la profondeur.

Ainsi, la précision de la mesure du volume des bassins, obtenue à partir de mesures de profondeur, est semblable à celle du profil transversal. Cependant, dans les petits cours d'eau le faible nombre de bassins

et leur répartition inégale rendent cette mesure peu appropriée pour évaluer l'effet de l'aménagement des ponceaux.

3.4 Granulométrie du substrat

3.4.1 Description

L'érosion et la déposition de particules peuvent changer la granulométrie du substrat du lit. La proportion de particules fines, ou mieux la distribution de la dimension des particules du substrat, sont des paramètres représentatifs de la qualité d'une frayère. Dulude et Vallières (1992) ont démontré que le taux d'émergence des alevins d'omble de fontaine diminue sous 90, 70, 25 et 10 % lorsque le volume de particules fines dépasse respectivement 0, 10, 30 et 50 % du volume du substrat. Les fines particules de sable ajoutées au substrat par ces auteurs avaient un diamètre compris entre 0,05 et 2 mm. La dimension limite choisie pour définir les particules fines dépend de l'objectif de l'étude et varie surtout entre 2 et 4 mm, selon King et Potyondy (1993). Une valeur de 1 mm a été utilisée par Lotspeich et Everest (1981) pour évaluer en laboratoire la fiabilité d'indices granulométriques tels le diamètre arithmétique moyen, le diamètre géométrique moyen, le coefficient de tri et l'indice de Fredle. Hausle et Coble (1976) et Carline (1980) ont fixé la limite à 2 mm pour leur étude. Les premiers avaient pour objectif de corrélérer les particules fines dans le gravier à frayère au taux d'émergence des alevins de l'omble de fontaine et le second, de comparer la granulométrie de différents sites de frai (naturel, aménagé) avec d'autres sites non sélectionnés par l'omble de fontaine. Pour King et Potyondy (1993), tout le matériel inférieur à environ 6,3 mm était considéré fin. Au Québec, le substrat idéal pour la fraie de l'omble de fontaine se compose de particules de 5 à 50 mm de diamètre et ne contient qu'une faible quantité (< 20 %) de particules plus fines (Jacques Boivin, 1998 : comm. personnelle). Compte tenu de cette caractéristique et du fait que les truites peuvent éliminer en grande partie les particules inférieures à 1 ou 2 mm lors du déblaiement du site de frai (Young *et al.*, 1991), la taille limite des particules fines a été fixée à 5 mm pour notre étude.

3.4.2 Méthode de mesure

Une première approche pour qualifier la granulométrie du lit consiste à enfoncer un cylindre dans le substrat (ex. échantillonneur McNeil et Ahnell, (1960)) afin de prélever les grosses particules à l'aide d'une pelle. L'eau contenue dans le cylindre est ensuite filtrée pour recueillir le matériel plus fin (Lisle et Eads, 1991 ; Platts *et al.*, 1983). Une seconde approche consiste à congeler un volume de sol et d'eau autour d'un ou de plusieurs tubes enfoncés dans le substrat. L'agent réfrigérant introduit dans le tube est composé d'un mélange de glace sèche et d'acétone (Ryan, 1970), d'azote liquide (Stocker et Williams, 1972) ou de CO₂ liquide (Carling et Reader, 1981 ; Walkotten, 1973 et 1976).

Selon Everest *et al.* (1980), l'utilisation de trois tubes à congélation disposés en triangle permet la prise d'échantillons de plus de 20 kg. Ces échantillons seraient plus représentatifs du lit que les carottes obtenues avec un seul tube ou avec l'échantillonneur McNeil et Ahnell (1960) (Tableau 2). Pourtant, Lisle et Eads (1991) ont démontré que des échantillons de 50 cm de profondeur, congelés à l'aide des trois tubes, et pesant 10 à 15 kg, ne fournissaient pas une distribution fiable de l'ensemble des particules. Le pourtour des carottes de substrat congelé est constitué majoritairement de particules grossières du fait qu'un seul point de contact gelé suffit pour souder une particule à la carotte. Cet effet entraîne une surestimation de la proportion de particules grossières et conséquemment, une sous-estimation de la proportion de particules fines. Ce biais peut être réduit en prélevant des échantillons de grande taille. Une règle empirique veut que la particule la plus grosse de l'échantillon ne doive pas occuper plus de 5 % du volume. Ainsi, un échantillon contenant une particule de 100 mm de diamètre devrait peser au moins 28 kg et ce, en considérant une densité des particules de 2,7 g cm⁻³. Il faudrait 50 kg pour réduire à 1 % l'erreur sur la granulométrie de l'échantillon (Lisle et Eads, 1991).

Dans la présente étude, la granulométrie du substrat a été obtenue par la méthode des tubes à congélation parce qu'elle permet de séparer les échantillons en plusieurs couches et d'en évaluer la proportion de particules fines (Tableau 2). L'échantillonnage à l'aide d'un seul tube a été privilégié afin d'en faciliter l'enfoncement dans les substrats pierreux et de limiter le poids de l'échantillon à extraire. À l'aide d'une masse, un tube d'acier creux et terminé par une pointe est enfoncé verticalement jusqu'à 25 cm de profondeur afin de couvrir l'épaisseur du substrat qui peut être utilisé pour le frai de l'omble de fontaine. Pour éviter les risques associés à l'utilisation de bonbonnes (N₂ ou CO₂), de la glace sèche (CO₂ solide) a été utilisée comme agent réfrigérant. Un volume d'environ 100 ml d'alcool éthylique pur à 95 % est versé dans le tube de 5 cm de diamètre afin d'assurer un bon contact thermique entre le tube et les morceaux de glace sèche qui y sont introduits par la suite. Ce mélange de glace sèche et d'alcool éthylique se maintiendrait à -78°C en absence d'échange thermique. Il refroidit la paroi du tube et fait geler le substrat tout autour. Des essais en cours d'eau ont démontré que la congélation du substrat pendant 15 à 20 minutes permet d'obtenir, dans le gravier, un échantillon congelé pouvant atteindre 15 à 20 cm de diamètre par 30 cm de profondeur et pesant jusqu'à 9 kg (masse sèche). Les échantillons sont plus petits en milieu sablonneux. Un bloc de 45 kg de glace sèche suffit pour prélever environ 20 échantillons, à raison de 250 à 500 g de glace par échantillon.

Tableau 2 Avantages et désavantages de l'échantillonneur McNeil et de la congélation pour évaluer la granulométrie du substrat

| Technique | Avantages | Désavantages |
|--|---|--|
| Tube McNeil ^a | <ul style="list-style-type: none"> ▶ Rapide et peu onéreux ▶ Bonne quantité de particules | <ul style="list-style-type: none"> ▶ Perte possible d'une partie des particules fines en suspension dans l'eau ▶ Distribution verticale des particules fines non mesurable ▶ Peut être difficile d'enfoncer le cylindre à la profondeur désirée ▶ Biais dû aux grosses particules poussées vers l'extérieur du tube ▶ Ne peut être utilisé lorsque les particules sont trop grosses ou dans un substrat compacté |
| Carotte congelée ^b (1 tube ou 3 tubes en triangle) | <ul style="list-style-type: none"> ▶ Permet de garder la stratification des particules sauf pour les plus fines ▶ Assez rapide ▶ Échantillons assez gros | <ul style="list-style-type: none"> ▶ L'introduction du tube (ou 3 tubes) secoue le substrat et favorise la migration des particules fines vers le bas ▶ Dans le substrat grossier, la carotte peut être trop petite pour constituer un échantillon représentatif du substrat. Le biais diminue avec l'augmentation de la dimension de la carotte, qui augmente avec le temps de congélation ou avec l'utilisation de trois tubes ▶ Nécessite l'utilisation d'un déflecteur de courant |

a. Échantillonneur McNeil (McNeil et Ahnell, 1960)

b. Adapté de Everest *et al.*, 1980 ; Platts *et al.*, 1983 ; Lisle et Eads, 1991

Le prélèvement d'échantillons congelés a été effectué à tous les biefs. Cependant, seulement quatre carottes congelées ont été prélevées par bief afin de limiter les perturbations causées par l'échantillonnage. Les résultats obtenus peuvent ensuite être comparés à ceux du décompte des particules, comme le suggèrent Shirazi *et al.* (1981). Chacune des carottes congelées a été prélevée et déposée dans une boîte subdivisée en trois compartiments par des tôles disposées verticalement. L'espacement entre les tôles permet de définir trois couches de profondeur : de 0 à 8 cm, de 8 à 16 cm et de 16 à 24 cm. Des sacs de plastique dûment identifiés et placés dans une ouverture au fond de chaque compartiment ont permis la récolte du substrat à mesure que la carotte dégelait.

3.4.3 Efficacité de l'échantillonnage

La masse des carottes congelées extraites dans cette étude (Tableau 3) est nettement plus faible que celle proposée (10-15 kg) par Lisle et Eads (1991). Cependant, les échantillons recueillis sont conformes à la recommandation de ces auteurs qui estiment que la masse de la plus grosse particule ne doit pas dépasser 5 % de la masse totale. Étant donné que le diamètre de chaque particule n'est pas mesuré exactement mais seulement classifié, le pourcentage occupé par la classe des particules les plus grosses est distribué sur les trois ou quatre cailloux présents dans cette classe (Tableau 3). On se rapproche alors de la règle du 5 % pour le plus gros cailloux. Les coefficients de variation moyens pour les quatre biefs de chaque ruisseau ont varié entre 17 et 40 % sauf pour le ruisseau RM dont le substrat est composé de sable. Cependant, à partir de la variabilité des proportions de particules fines obtenue parmi des échantillons prélevés en aval seulement, il a été estimé qu'il faudrait observer un changement relatif d'au moins 20 %, avec un niveau de confiance de 80 %, pour démontrer qu'il y a véritablement eu un changement (Tableau 3). La prise d'un plus grand nombre ou de plus gros échantillons (trois tubes) que nécessiterait une meilleure évaluation du changement du pourcentage de particules fines est limitée par la faible dimension des frayères. Malgré la forte variabilité spatiale naturelle de la proportion de particules fines dans le substrat, il a été possible de déceler une tendance à l'augmentation de la proportion de particules fines avec la profondeur (Tableau 4). Ainsi, le diamètre médian moyen diminue à mesure que la profondeur du substrat augmente (Tableau 5).

Ainsi, la mesure de la granulométrie de la strate supérieure du lit (0-8 cm) obtenue par la méthode des carottes congelées nous apparaît peu recommandable. Sa mise en œuvre est en effet laborieuse en plus de perturber une proportion relativement élevée du substrat dans les petits cours d'eau.

Tableau 3 Caractéristiques du substrat des ruisseaux à l'étude avant la construction des ponceaux

| Ruisseaux : | | BT | EG | ET | FM | IT | JB | RM | 18 |
|---|----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------------|---------|
| Nombre de carottes par ruisseau : | | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 15 | 16 |
| Couche 0-24 cm^a – Échantillons congelés | | | | | | | | | |
| Masse sèche | Moyenne (kg) | 2,3 | 3,0 | 3,5 | 4,3 | 1,7 | 1,8 | 0,24 | 2,6 |
| | Limites (kg) | 1,2-4,0 | 1,5-4,3 | 1,9-6,0 | 1,4-9,0 | 1,0-2,7 | 0,3-3,0 | 0,07-0,55 | 1,6-3,9 |
| Diamètre médian | D ₅₀ (mm) | 16 | 14 | 13 | 20 | 4 | 9 | 0,3 | 15 |
| Particules fines < 5 mm | % masse sèche | 33 | 35 | 34 | 28 | 54 | 43 | 100 | 30 |
| | CV moyen ^b (%) | 40 | 27 | 31 | 26 | 17 | 27 | .05 ^c | 21 |
| Classe des particules les plus grosses | Diamètre (mm) | 75 | 80 | 75 | 75 | 75 | 75 | 6,3 | 80 |
| | % masse sèche | 15 | 12 | 12 | 24 | 3 | 13 | 0,03 | 14 |
| Nombre de carottes en amont : | | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Nombre Nécessaire en Amont $\alpha=0.2$ | Seuil 10 % ^d | 95 | 12 | 84 | 5 | 4 | 107 | 1 | 12 |
| | Seuil 20 % ^d | 24 | 4 | 21 | 2 | 2 | 27 | 1 | 4 |
| | Seuil 30 % ^d | 11 | 2 | 10 | 2 | 2 | 13 | 1 | 2 |
| Nombre de carottes en aval : | | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 11 | 12 |
| Nombre Nécessaire en aval $\alpha=0.2$ | Seuil 10 % ^e | 41 | 33 | 31 | 38 | 15 | 76 | n.a. ^h | 15 |
| | Seuil 20 % ^e | 11 | 9 | 8 | 10 | 4 | 20 | n.a. | 4 |
| | Seuil 30 % ^e | 5 | 4 | 4 | 5 | 3 | 9 | n.a. | 3 |
| Couche 0-8 cm – Échantillons congelés | | | | | | | | | |
| Diamètre médian D ₅₀ ^f | (mm), 0 < D < 80 | 15 | 18 | 15 | 28 | 7 | 8 | 0,4 | 16 |
| | (mm), 2 < D < 80 | 21 | 27 | 23 | 35 | 13 | 18 | n.a. | 20 |
| Particules fines | % masse sèche | 30 | 27 | 32 | 22 | 44 | 43 | 100 | 25 |
| Surface du substrat – Décompte des particules | | | | | | | | | |
| Diamètre médian D ₅₀ ^g | (mm), 0 < D < 250 | 4 | 17 | 8 | 9 | < 2 | < 2 | n.d. ⁱ | n.d. |
| | (mm), 2 < D < 250 | 13 | 31 | 22 | 15 | 5 | 11 | n.d. | n.d. |
| Particules fines < 5 mm | % nombre | 51 | 30 | 40 | 33 | 73 | 60 | n.d. | n.d. |

a. Pour la couche 0 à 24 cm, les calculs sont effectués sur une carotte idéale composée de trois couches de même masse.

b. Moyenne des coefficients de variation calculée sur chacun des quatre groupes de 4 carottes.

c. Déterminé en amont seulement, un an après la construction du ponceau.

d. Seuil x % : nombre de carottes nécessaires pour qu'une variation relative observée supérieure à x % de la proportion de particules fines en amont du ponceau permette de rejeter l'hypothèse qu'il n'y a eu aucun changement de la proportion de particules fines avec un niveau de confiance 1- α .

e. Seuil x % : nombre de carottes nécessaires pour qu'une augmentation relative observée de x % de la proportion de particules fines en aval du ponceau permette de conclure à une augmentation supérieure à 0 % avec un niveau de confiance 1- α .

f. Diamètre médian calculé sur la masse des particules dont le diamètre D est compris dans les limites indiquées.

g. Diamètre médian calculé sur le nombre des particules dont le diamètre D est compris dans les limites indiquées.

h. n.a. : non applicable

i. n.d. : non disponible

Tableau 4 Proportion des particules fines (< 5 mm) par couche de profondeur pour l'ensemble des carottes congelées extraites pour chaque ruisseau

| Couche de profondeur | % de particules fines dans chaque ruisseau ^a | | | | | | | | |
|------------------------|---|----|----|----|----|----|-----|----|------|
| | BT | EG | ET | FM | IT | JB | RM | 18 | Moy. |
| 0 – 8 cm | 30 | 27 | 32 | 22 | 44 | 41 | 100 | 25 | 40 |
| 8 – 16 cm | 31 | 34 | 37 | 31 | 62 | 43 | 100 | 33 | 46 |
| 16 – 24 cm | 39 | 44 | 35 | 33 | 59 | 44 | 100 | 30 | 48 |
| 0 – 24 cm ^b | 33 | 35 | 34 | 28 | 54 | 43 | 100 | 30 | |
| Nombre d'échantillons | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 15 | 16 | |

a. Les proportions sont exprimées en % de la masse sèche totale.

b. Les trois couches combinées, même valeur qu'au Tableau 3.

Tableau 5 Diamètre médian des particules par couche de profondeur pour l'ensemble des carottes congelées extraites pour chaque ruisseau

| Ruisseau | n | Roches > 80 mm (% masse) | Diamètre médian (mm) des particules < 80 mm | | | | | |
|----------|----|-----------------------------|---|---------|----------|------------------------|------|------|
| | | | 0 – 8 cm | 8-16 cm | 16-24 cm | 0 – 24 cm ^a | | |
| BT | 16 | 0,0 | 14,6 | < | 18,0 | > | 13,2 | 15,7 |
| EG | 16 | 1,3 | 18,2 | > | 14,6 | > | 8,7 | 14,0 |
| ET | 16 | 0,0 | 14,7 | > | 10,4 | < | 12,9 | 12,5 |
| FM | 16 | 8,5 | 27,5 | > | 17,6 | > | 16,0 | 20,4 |
| IT | 16 | 0,0 | 6,7 | > | 1,9 | < | 2,3 | 3,8 |
| JB | 16 | 0,0 | 8,4 | < | 8,7 | < | 9,0 | 8,7 |
| RM | 15 | 0,0 | 0,39 | > | 0,33 | > | 0,30 | 0,34 |
| 18 | 16 | 0,0 | 15,9 | > | 11,7 | < | 17,4 | 14,8 |
| Moyenne | | | 13,4 | > | 10,5 | > | 10,1 | 11,3 |

a. Les trois couches combinées.

3.5 Granulométrie de la surface du lit

3.5.1 Description

L'érosion du lit et la déposition de particules reliées à l'aménagement de ponceaux tendent respectivement à augmenter ou à diminuer la dimension des particules qui forment la surface du lit. La nature de cette surface est surtout caractérisée par la distribution de la dimension des particules et par le degré d'enclassement des particules grossières. L'enclassement qui représente le degré de recouvrement des grosses particules par les particules fines (Platts *et al.*, 1983) n'a pas été mesuré, car il est normalement obtenu par une observation visuelle, donc subjective. La distribution de la dimension des particules de la surface du lit est un indice de la granulométrie du substrat (Kellerhals et Bray, 1971) dont le contenu en particules fines est relié à l'émergence des alevins (Dulude et Vallières, 1992). De plus, c'est une caractéristique facile à quantifier par le prélèvement et la classification d'un nombre fixe de particules de plus de 2 mm de diamètre dans la section du cours d'eau à l'étude (Wolman, 1954). Le décompte des particules a été retenu pour sa simplicité, son applicabilité à différents types de cours d'eau et sa capacité

à détecter les variations naturelles et celles dues à des traitements tels la construction de chemins et la récolte de la matière ligneuse (Marcus *et al.*, 1995 ; Potyondy et Hardy, 1994). La distribution des diamètres de particules obtenue par cette technique se compare, en théorie, à celle obtenue par tamisage de la couche superficielle du substrat (Kellerhals et Bray, 1971).

La particule prélevée est celle qui entre en contact avec un doigt enfoncé dans l'eau à chaque point de prélèvement (Wolman, 1954). Ces points peuvent être localisés au bout du pied à chaque pas en se déplaçant sur le lit ou à égales distances le long de tracés préétablis. Le décompte suivant une ligne diagonale par rapport aux rives permet d'échantillonner au hasard tous les faciès d'écoulement tandis que le prélèvement selon l'axe perpendiculaire à l'écoulement a plutôt pour but d'échantillonner un faciès ou un bief en particulier (Marcus *et al.*, 1995).

La façon de choisir les particules constitue la principale source de biais. On peut réduire l'erreur en marquant le bout de la botte ou le bout du doigt qui choisit la particule (Potyondy et Hardy, 1994). Lorsque le courant est fort, il est difficile de prendre la particule exactement dans la direction verticale, car le courant dévie le pointeur qui a alors tendance à s'arrêter sur une plus grosse particule. Ce biais peut être diminué en échantillonnant systématiquement selon un quadrillage préétabli (Hey et Thorne, 1983 ; Marcus *et al.*, 1995). L'utilisation de gants isolés imperméables, souvent nécessaire en eau froide, ne modifie pas les résultats (Marcus *et al.*, 1995). Une autre source d'erreur de la méthode peut provenir du choix de l'axe des particules et de la lecture de la dimension de ces dernières par l'observateur (Marcus *et al.*, 1995). La mesure à l'aide d'un ruban ou pied à coulisse donne des résultats plus variables que ceux obtenus à l'aide d'un gravelomètre, surtout lorsque les roches sont plates (Hey et Thorne, 1983 ; Marcus *et al.*, 1995). Une plaque percée de trous carrés de différentes dimensions, appelée gravelomètre, a donc été utilisée pour éliminer cette source d'erreur tout en facilitant la mesure (Figure 6).

Pour réduire l'erreur d'échantillonnage, Wolman (1954) et Kondolf (1997) suggèrent de recueillir un minimum de 100 particules, tandis que 60 ou 70 particules suffisent selon Brush (1961) et Mosley et Tindale (1985). King et Potyondy (1993) recommandent de hausser ce nombre à 200 ou même 300 particules pour détecter un faible changement qu'ils n'ont cependant pas défini. Les erreurs aléatoires décroissent rapidement avec la taille de l'échantillon, de sorte que les différences observées par deux observateurs deviennent vite significatives et sont attribuables à une différence systématique d'échantillonnage (Hey et Thorne, 1983). Enfin, pour récolter 100 particules dans un petit cours d'eau de 2 à 3 m de largeur, il faut effectuer de cinq à six traversées. Pour une traversée à tous les mètres, cela requiert environ 5 m de longueur. Le prélèvement d'un plus grand nombre de particules risque d'étendre l'échantillonnage sur plus d'un faciès d'écoulement. Conséquemment, dans la présente étude, la grandeur de l'échantillon à récolter a été fixée à 100 particules de plus de 2 mm de diamètre. Cependant, chaque prélèvement de particule plus petite que 2 mm a quand même été enregistré de façon à pouvoir exprimer la granulométrie de la surface du lit par rapport à toutes les particules, même à celles de plus de 2 mm de diamètre.

La comparaison de la granulométrie du cours d'eau avec celle provenant d'un échantillonnage antérieur ou avec celle provenant d'un autre cours d'eau doit être interprétée avec prudence lorsque les données sont récoltées par différents opérateurs (Marcus *et al.*, 1995 ; Wohl *et al.*, 1996). Après avoir comparé plusieurs méthodes, Wohl *et al.* (1996) ont suggéré, comme l'avait fait Hey et Thorne (1983), d'entraîner un seul opérateur et d'utiliser l'approche de Wolman (1954), c'est-à-dire la démarche aléatoire ou encore des lignes de récoltes espacées de la moitié de la valeur du diamètre de la plus grosse particule.

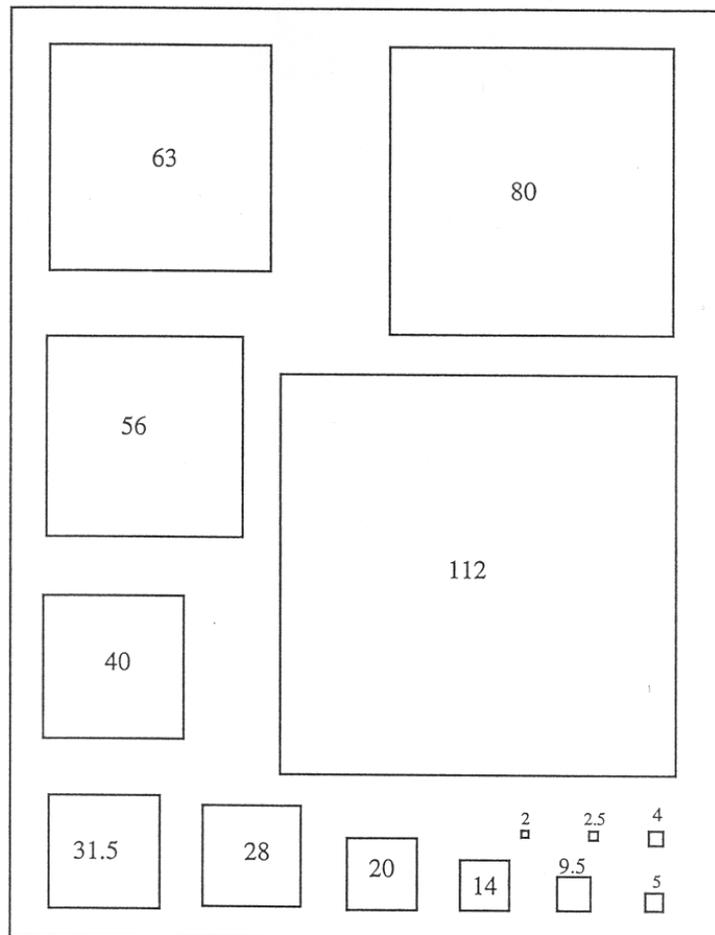


Figure 6 Gravelomètre composé d'une plaque d'acier inoxydable de 1,6 mm d'épaisseur perforée de trous carrés dont la longueur d'un côté est donnée en mm

3.5.2 Méthode de mesure

Compte tenu de ce qui précède, le décompte a été effectué sur des lignes perpendiculaires aux berges afin (i) d'évaluer la dimension des particules sur les frayères, (ii) d'effectuer les prélèvements subséquents aux mêmes endroits et (iii) d'éviter de perturber le lit aux endroits où il y a d'autres mesures à prendre. Le long de la ligne, les points de prélèvements étaient répétés à tous les 30 cm, non pas directement sur la ligne mais plutôt à 25 cm de part et d'autre afin de tenir compte de la dimension maximale des particules prélevées et de l'espacement de 30 cm suggéré par Platts *et al.* (1983). Les marques sur le bout des doigts ou de la botte n'ont pas été utilisées parce que peu visibles en raison de la coloration ou de la profondeur de l'eau.

3.5.3 Erreurs de mesure

Le pourcentage moyen de particules fines (< 5 mm) tend à augmenter de 2 % (-12 % à 12 %) lorsque le nombre de particules prélevées passe de 60 à 100 et de 3,5 % (-2 % à 9 %) lorsqu'il passe de 60 à 150 particules (Tableau 6). Ce pourcentage diminue de -1,5 % (-2 % à -1 %) lorsqu'on passe de 150 à 200 particules prélevées, mais cette valeur est basée sur des mesures dans deux biefs seulement. Ces résultats démontrent que le pourcentage moyen de particules fines d'un échantillon de 100 particules diffère de 2 à

3 % de celui d'un échantillon de 60 ou 150 particules. Ainsi, les pourcentages de particules fines obtenus par les décomptes des premières 60, 100 et 150 particules diffèrent par environ $\pm 10\%$, ce que nous considérons équivalent à l'erreur associée à cette technique. La reproductibilité de la méthode n'a pas été vérifiée par des prélèvements successifs le même jour et au même endroit. Cependant, après un an, des mesures prises dans des biefs maintenus à l'état naturel et en l'absence de crues importantes montrent une variation moyenne de 21 % entre les deux mesures du pourcentage de particules fines (Tableau 7).

Tableau 6 Pourcentage de particules fines (< 5 mm) composant la surface du lit selon le nombre de particules prélevées

| Ruisseau | Bief | Nombre de particules mesurées | | | | Ruisseau | Bief | Nombre de particules mesurées | |
|----------|------|-------------------------------|-----|-----|-----|----------|------|-------------------------------|-----|
| | | 60 | 100 | 150 | 200 | | | 60 | 100 |
| EG | M | 24 | 29 | 25 | 23 | FM | M | 32 | 27 |
| ET | M | 5 | 5 | 7 | 6 | FM | A | 21 | 31 |
| BT | A | 27 | 24 | 35 | | FM | B | 64 | 52 |
| EG | A | 21 | 20 | 22 | | FM | C | 22 | 23 |
| EG | B | 36 | 40 | 42 | | IT | M | 59 | 71 |
| ET | A | 23 | 32 | 32 | | IT | A | 70 | 78 |
| BT | M | 34 | 40 | | | IT | B | 60 | 61 |
| BT | B | 50 | 51 | | | IT | C | 82 | 82 |
| BT | C | 83 | 82 | | | JB | M | 41 | 41 |
| | | | | | | JB | A | 23 | 26 |
| | | | | | | JB | B | 75 | 81 |
| | | | | | | JB | C | 100 | 100 |

Tableau 7 Pourcentage de particules fines (< 5 mm) composant la surface du lit durant un intervalle de 1 an dans des biefs non affectés par l'installation de ponceaux

| Ruisseau | Bief | 1998 | | 1999 | | Variation |
|----------|------|----------------|---------|------|---------|-----------|
| | | N ^a | % fines | N | % fines | |
| FM | M | 119 | 28 | 110 | 15 | 46 |
| EG | M | 202 | 23 | 124 | 31 | 35 |
| ET | A | 103 | 28 | 104 | 30 | 7 |
| ET | B | 60 | 92 | 110 | 90 | 2 |
| IT | M | 106 | 70 | 100 | 61 | 13 |
| Moyenne | | | 48 | | 45 | 21 |

a. N : nombre total de particules dans l'échantillon

Le diamètre médian (D_{50}) et le pourcentage de particules fines sont les caractéristiques de la granulométrie utilisées pour comparer la surface du lit à la couche de substrat entre 0 et 8 cm de profondeur (Tableau 3). Le diamètre médian des particules de la surface a été calculé de façon à ce que 50 % (en nombre) des particules aient un diamètre plus petit que D_{50} . Le diamètre médian des particules du substrat a été calculé de façon à ce que 50 % (en poids) de l'échantillon soit composé de particules de diamètre plus petit que D_{50} . Ces deux mesures sont compatibles comme l'ont démontré Kellerhals et Bray (1971). Les six cours d'eau comparés présentent un D_{50} plus faible en surface qu'en profondeur (0-8 cm)

et, conséquemment, un pourcentage de particules fines plus élevé en surface (Tableau 3). Les cours d'eau retenus pour l'étude devaient mesurer moins de 50 % de la superficie du lit occupée par les particules fines. Cette appréciation visuelle est corroborée par la granulométrie de la couche supérieure (0-8 cm) dont le pourcentage de sédiments fins est inférieur à 50 % (Tableau 3) dans tous les ruisseaux (sauf RM, qui avait été choisi parce qu'il était tout en sable). Toutefois, cette appréciation visuelle n'est pas corroborée par le décompte des cailloux, ce qui donne un pourcentage de sédiments fins en surface dépassant 50 % en nombre dans trois cours d'eau sur six. Ces résultats semblent être causés par une surestimation des particules plus grosses dans le cas des carottes congelées, car la périphérie des carottes est souvent constituée de particules plus grosses que la moyenne. Contrairement à ce qui a été constaté par Wolman (1954) et Kondolf (1997) avant la pose du ponceau, le D_{50} moyen des particules à la surface du lit est plus petit (5 ruisseaux sur 6) que le D_{50} moyen du substrat de 0-8 cm de profondeur (Tableau 3). Leurs échantillons de substrat contenaient beaucoup de particules fines. Après l'enlèvement de particules de diamètre inférieur à 4 mm parmi des échantillons du substrat (les plus difficiles à saisir dans la méthode du décompte des particules), Kondolf (1997) a observé que les deux courbes cumulatives de la masse par rapport au diamètre des particules se rapprochaient. Si on ne considère que les particules plus grosses que 2 mm dans le calcul du D_{50} à la surface des ruisseaux à l'étude, ce dernier devient comparable en moyenne au D_{50} de la couche 0 à 8 cm calculé sur toutes les particules, mais les écarts restent importants (Tableau 3).

Le décompte des particules est une méthode simple pour déterminer la présence ou l'absence d'une frayère potentielle et les changements de la granulométrie à la surface du lit. Cependant, cette méthode paraît plus appropriée pour détecter les zones relativement permanentes d'affouillement plutôt que celles de dépôts de particules. Les particules fines déposées sont facilement éliminées de la surface du substrat lors des crues. La déposition doit être détectée par une méthode qui permet de mesurer les particules fines retenues dans le substrat.

3.6 Indice du charriage de fond

3.6.1 Description

Le charriage de fond comprend les processus de saltation, de roulement et de glissement des particules près de la surface du lit. Les particules ainsi charriées sont plus susceptibles de se déposer sur les frayères ou de pénétrer dans le substrat que les particules en suspension, d'où l'intérêt de mesurer la circulation des particules près du fond des ruisseaux.

3.6.2 Méthode de mesure

Une première approche pour évaluer le charriage de fond consiste à capter l'eau qui circule près du fond (ex. 0-10 cm) sur une certaine largeur du cours d'eau (ex. 10 cm), durant une minute environ (Ryan et Troendle, 1999). L'eau est ensuite filtrée pour estimer la quantité de particules charriées. L'autre approche consiste à enlever le substrat sur une certaine profondeur et à remplir le trou avec des particules de 1 à 2 cm de diamètre ne contenant aucune particule plus fine (Lisle et Eads, 1991). Ce gravier expérimental est déposé dans un récipient rigide enfoui à égalité de la surface du substrat (Figure 7) ou sur un récipient non rigide appelé sac collecteur (Figure 8) placé au fond du trou. Après un certain laps de temps, le contenu du récipient prélevé est lavé afin de déterminer la quantité de particules fines captées.

Toutefois, les deux approches ne donnent qu'un indice du charriage de fond, car le fait de placer un instrument sur le lit ou dans le lit change les conditions de l'écoulement et, par conséquent, la quantité de particules captées (Wigham, 1972). Le charriage de fond varie considérablement dans le temps et dépend de la localisation par rapport à la berge et au thalweg (Wigham, 1972). Son évaluation requiert, par conséquent, la prise de plusieurs échantillons. Aucun standard n'a été établi pour évaluer le charriage de

fond en raison de sa complexité (MacDonald *et al.*, 1991). L'utilisation du gravier expérimental placé dans le lit a été retenue car cette approche permet un échantillonnage continu dans le temps.

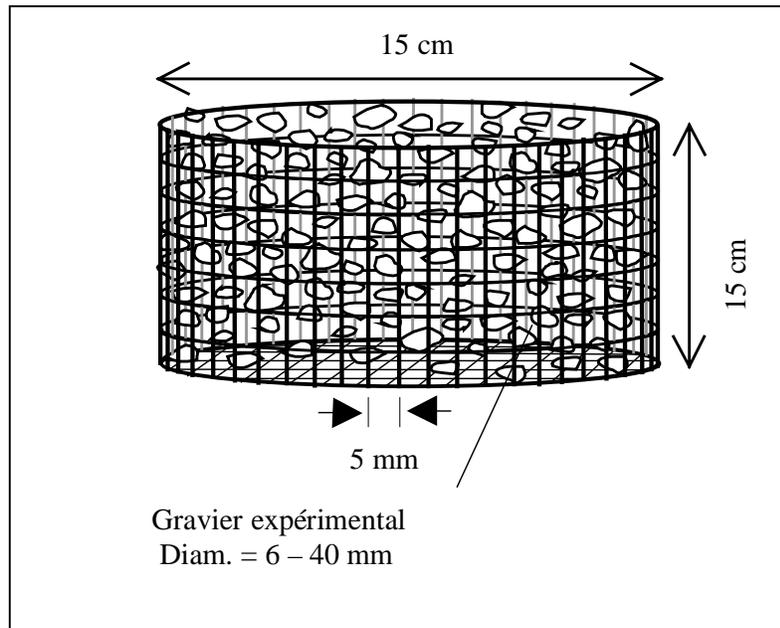


Figure 7 Contenant rigide à parois perforées enfoui dans le lit

Un tube à congélation (Lisle et Eads, 1991) inséré verticalement dans le gravier expérimental du sac permet d'obtenir la distribution verticale des particules fines lors du prélèvement (Figure 8). Le choix de la dimension et du nombre de récipients découle d'un compromis entre la précision requise, l'étendue des frayères et l'effort nécessaire. Le temps requis pour réaliser une prise d'échantillons combinant le sac et le

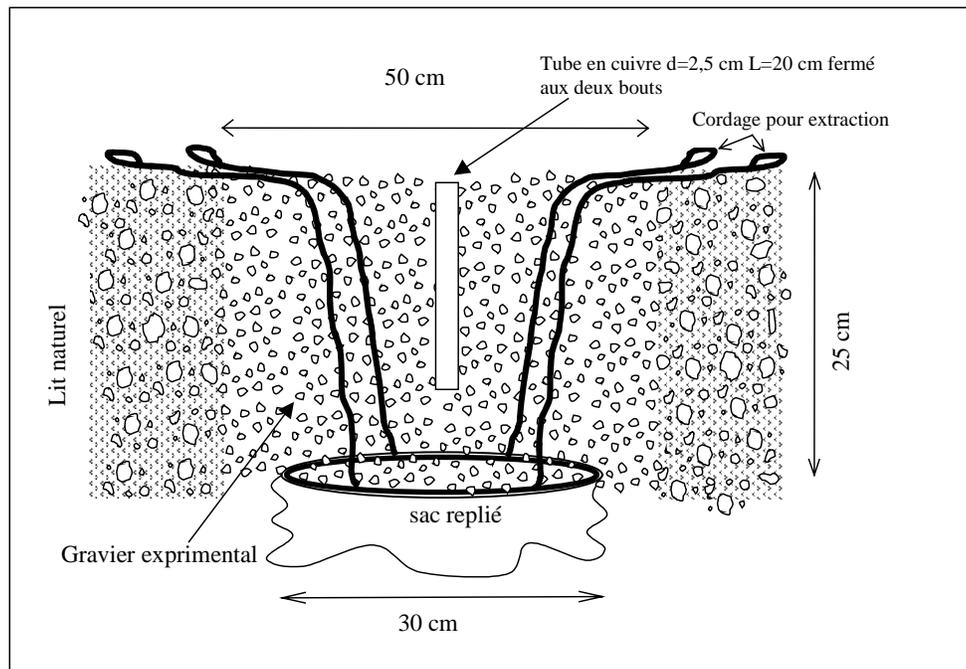


Figure 8 Dispositif de mesure du charriage de fond comprenant un sac collecteur et un tube à congélation enfouis dans le gravier expérimental

tube congelé impose une limite sur le nombre d'installations par frayère. Cette limite se situe entre 6 et 12 selon Lisle et Eads (1991). Selon ces auteurs, la quantité de particules fines qui s'infiltré dans le lit peut être évaluée avec une bonne précision à l'aide de contenants rigides ou de sacs collecteurs. Dans une frayère à salmonidés, un test a été fait en disposant, dans le sens de l'écoulement, deux rangées de six contenants de huit litres. Les coefficients de variation de la quantité de particules fines (< 2 mm) captée étaient relativement faibles (11 et 9 %) et similaires entre les deux rangées. Cependant, il est souhaitable de répartir les contenants sur un profil transversal, car Lisle et Eads (1991) ont constaté une grande variabilité latérale du charriage de fond dans le cours d'eau. Wesche *et al.* (1989) affirment que les contenants rigides à parois perforées sont adéquats pour suivre l'évolution de la quantité de particules fines libérées par des activités d'aménagement telles que la coupe forestière, la construction de routes et l'excavation d'un barrage hydroélectrique.

Dans la présente étude, des récipients rigides et des sacs collecteurs ont été testés. Un tube à congélation a été enfoui verticalement dans le gravier expérimental des sacs collecteurs afin d'évaluer la distribution verticale des particules fines. À la suite de l'expérimentation de ces méthodes, nous constatons que la technique faisant appel aux sacs collecteurs est plus onéreuse. Elle requiert plus de gravier expérimental qu'un récipient rigide de même diamètre et plus de manipulations pour l'installation et l'extraction du sac. Cependant, le récipient rigide est plus facilement arraché (Davies et Nelson, 1993 ; Lisle et Eads, 1991) que le sac collecteur lorsque le lit est soumis à l'érosion. La restriction du mouvement latéral de l'eau et des particules fines, même lorsque des perforations d'environ 1 cm de diamètre sont pratiquées dans les parois du récipient rigide, représente un autre désavantage de ce dernier (Tableau 8). De plus, ces perforations laissent échapper des particules fines lors du retrait du modèle de récipient utilisé lors de cette étude. Le collecteur de sédiments développé à la suite de la présente étude par la compagnie Bio Innove inc. (brevet en instance) comprend un mécanisme d'ancrage et de fermeture des perforations (1,4 cm de diamètre) qui élimine les principaux désavantages précités (Bio Innove inc., 2001 ; Delisle et Dubé, 2001).

Tableau 8 Avantages et désavantages des indices de mesure du déplacement des particules à la surface du lit (charriage de fond) et de la pénétration des particules fines dans le gravier

| Technique | Avantages | Désavantages |
|--|---|--|
| Contenant rigide à parois pleines | <ul style="list-style-type: none"> ▶ Facile à installer et à remplacer^a ▶ Permet un grand nombre de points de mesure^a ▶ Facile à construire : une boîte de conserve est de la bonne dimension | <ul style="list-style-type: none"> ▶ L'érosion peut exposer l'ouverture du contenant au-dessus de la couche mouvante du charriage de fond^a ▶ Perte de boîtes W-V^b (WESCHE <i>et al.</i>, 1989) (17 % ont été perdues dont 60 % étaient installées dans un site ayant une pente de 4,5 %)^a ▶ La sédimentation peut colmater l'ouverture du contenant^a ▶ Exclut le transport latéral de sédiments dans le substrat |
| Contenant rigide à parois perforées | <ul style="list-style-type: none"> ▶ Permet l'infiltration des sédiments due au transport latéral dans le substrat ▶ Les boîtes W-V^b en polypropylène sont réutilisables à 90 % un minimum de 3 fois (Wesche <i>et al.</i> 1989) | <ul style="list-style-type: none"> ▶ La forme et la taille des orifices peuvent empêcher certaines particules d'entrer ▶ Lors du retrait des contenants, les ouvertures des boîtes W-V laissent échapper des particules fines |
| Contenant rigide à parois perforées avec obturateurs | <ul style="list-style-type: none"> ▶ Permet l'infiltration des sédiments due au transport latéral dans le substrat ▶ Facile à installer et à remplacer ▶ Le collecteur de sédiments de la compagnie Bio InnoVe Inc. inclut un système d'ancrage, est réutilisable plusieurs fois et possède un système d'obturation des perforations permettant de retenir les sédiments fins. Il est muni d'un troisième contenant permettant le transport de l'échantillon vers le laboratoire ▶ Permet la récupération rapide des sédiments en laboratoire | <ul style="list-style-type: none"> ▶ La forme et la taille des orifices peuvent empêcher certaines particules d'entrer |
| Sac collecteur (Sterling) | <ul style="list-style-type: none"> ▶ Le charriage de particules dû au courant dans le gravier n'est pas affecté ▶ Pas affecté par l'érosion ou le dépôt des particules à la surface | <ul style="list-style-type: none"> ▶ Technique plus complexe qui demande plus de matériel et de travail que l'utilisation de récipients rigides. Elle est plus onéreuse ▶ Pas de stratification possible de la granulométrie du substrat |
| Tube de congélation et contenant ou sac collecteur | <ul style="list-style-type: none"> ▶ Permet d'évaluer la stratification des particules fines dans le substrat car le tube est déjà placé ▶ N'ayant pas à enfoncer le tube, il peut avoir des parois minces et être plus conducteur | <ul style="list-style-type: none"> ▶ Le gel peut atteindre le fond du sac et rendre son prélèvement impossible sans bris. |

Adapté de Lisle et Eads (1991)

a. Commun au contenant rigide à parois pleines et à parois perforées.

b. Whitlock-Vibert (W-V) sont des boîtes 14 x 6,4 x 8,9 cm en polypropylène avec ouvertures rectangulaires de 3,5 x 13 mm sur les six faces servant habituellement à l'incubation des œufs dans les cours d'eau. En enlevant une des faces, ces boîtes ont été remplies de gravier expérimental de 12 à 25 mm par Wesche et al. (1989).

3.6.3 Efficacité de l'échantillonnage

La proportion de récipients rigides et de tubes perdus durant la période de mesure est liée à la probabilité des crues, particulièrement en automne et au printemps. Trente deux contenants cylindriques (15 cm de hauteur et 15 cm de diamètre) à parois perforées (orifices carrés de 5 mm) ont été installés sans ancrage dans deux cours d'eau en 1997, puis prélevés en 1998. Quatre (13 %) des 32 contenants n'ont pas été retrouvés. Ce nombre concorde avec les observations de Wesche *et al.* (1989). Leurs pertes ont été occasionnées, en proportions égales, par la glace printanière et les forts courants. Tous ces résultats démontrent qu'il est souhaitable d'ancrer les récipients rigides dans le lit afin d'éviter qu'ils soient

déplacés. Les tubes à congeler installés au-dessus des sacs collecteurs dans sept cours d'eau à l'étude se comportent comme les récipients rigides. Aucun tube à congeler laissé un mois dans le lit n'a été emporté par le courant. Parmi les 111 tubes laissés pendant un an, 14 (12,6 %) ont été emportés par le courant (érosion moyenne de 100 mm indiquée par les chaînes d'érosion), deux (1,8 %) ont été ensevelis par les particules fines (chaînes et sacs non retrouvés), deux ont été enlevés par la pelle mécanique et un a été vandalisé. Le nombre de tubes perdus peut être réduit en les remplissant d'eau avant de les insérer dans le lit de gravier. Cette mesure préventive n'est cependant pas efficace lorsque l'érosion atteint plus de 100 mm de profondeur ; il est alors nécessaire de les ancrer dans le lit.

Diverses précautions doivent être prises pour assurer la congélation adéquate du substrat expérimental autour des tubes. Dans cette expérience, on note en effet que six échantillons (5 %) sur un total de 116 ont été peu ou partiellement congelés. Le tube et la rallonge sont d'abord purgés en introduisant un tube de 5 mm de diamètre jusqu'au fond. Quelques flocons de glace sèche sont introduits entre les deux tubes et le bouchon au travers duquel passe le petit tube est refermé. La sublimation du gaz carbonique chasse l'eau par le petit tube. Après la purge, de l'eau peut s'infiltrer au niveau du joint d'étanchéité entre la rallonge et le tube. L'eau se mélange alors à l'alcool éthylique pour former un bouchon de neige au contact de la glace sèche, empêchant cette dernière de se rendre au fond du tube.

Le prélèvement d'échantillons de 10-15 kg par sac collecteur correspond à la masse recommandée par Lisle et Eads (1991). Cette masse a été atteinte (58 %) ou dépassée (16 %) dans 74 % des 111 sacs retirés du lit. Moins de 10 kg de matériel a été extrait dans près de 22 % des sacs à cause de l'érosion du matériel ou du bris de certains sacs. Les parois de 40 % des sacs collecteurs laissés durant un an ont subi une dégradation (pourriture) variant de légère à très importante. La quantité de sacs perdus en raison de l'érosion du lit (1), du vandalisme (1), de leur recouvrement par du nouveau substrat (1) et de leur prélèvement par une pelle mécanique (2) représentent 4,5 % du total des sacs enfouis dans le lit. Aucune perte n'a été observée pour les sacs collecteurs retirés après un mois. Les sacs qui ont permis le prélèvement de plus de 10 kg de substrat ont subi une érosion moyenne du gravier expérimental ou une déposition moyenne de particules de -40 mm (-161 à -7) et 32 mm (7 à 84) respectivement. Les masses moyennes de gravier expérimental prélevé dans la couche supérieure (0-8 cm) et la couche inférieure (8-16 cm) du sac collecteur à l'aide du tube de congélation, ont été de 0,475 et 0,445 kg respectivement.

Les cinq groupes de quatre sacs enfouis dans les sections témoins durant 11 mois environ (Tableau 9) ont capté en moyenne $20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ de particules fines. Le coefficient moyen de variation de la quantité de particules fines collectées par ces sacs (Tableau 9), est de 44 % et est semblable au coefficient de variation moyen de 49 % calculé sur sept groupes de quatre contenants rigides. La variabilité des valeurs obtenues par les tubes congelés placés au-dessus des sacs (Tableau 10) est similaire à celle observée dans les sacs (Tableau 9).

La quantité moyenne de particules fines captées par les sacs collecteurs des sections non traitées de trois ruisseaux est toujours plus petite pour la période de deux mois que celle correspondant à la période de 11 mois (Tableau 9). La moyenne des masses captées dans les sections non traitées de tous les ruisseaux confondus est de $2,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mois}^{-1}$ pour les sacs collecteurs et de $2,4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mois}^{-1}$ pour les contenants rigides. Toutefois, ces résultats n'ont pas été obtenus dans les mêmes ruisseaux ou la même année dans le cas du ruisseau EG. Cette valeur équivaut à une couche de 1,8 mm d'épaisseur par mois en considérant une densité apparente de $1,4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Le prélèvement à l'aide des sacs inclut les particules à la surface qui n'auraient pas pénétré dans le gravier expérimental. Lorsqu'il y a aggradation du lit, la quantité de particules déposées dans le substrat et à la surface de ce dernier peut être estimée avec une précision plus grande que celle obtenue par le profil transversal, à condition d'installer suffisamment de récipients collecteurs.

Ainsi, l'indice de transport par charriage de fond mesuré à l'aide de sacs collecteurs ou de contenants rigides a permis de détecter le transport de sédiments, même si ces derniers ne sont plus visibles en surface après le passage des crues. L'utilisation de contenants rigides est recommandée, car il est possible d'installer dix contenants rigides (10-15 cm en hauteur) avec les mêmes efforts que demande l'enfouissement de deux à quatre sacs collecteurs, tout en obtenant une précision comparable et un meilleur échantillonnage. Pour éviter la perte de contenants par le courant, il est préférable de les ancrer au substrat. Les contenants devraient être disposés sur deux rangées alignées transversalement par rapport au courant afin de tenir compte de la grande variabilité du charriage de fond. Ils devraient également être situés sur des lits de fraie qui présentent les mêmes conditions d'écoulement dans tous les biefs d'un même cours d'eau.

Tableau 9 Particules fines (< 5 mm) captées par le gravier expérimental des sacs collecteurs et des contenants rigides dans les sections non traitées

| Ruisseau | N | Période (mois) | Masse des particules fines | | | Ratio particules fines/gravier | | |
|----------------------|-------------------|----------------|-------------------------------|----------------------------------|--------------|--------------------------------|------------|--------------|
| | | | Moyenne (kg•m ⁻²) | Écart-type (kg•m ⁻²) | CV moyen (%) | Moyenne | Écart-type | CV moyen (%) |
| EG | 2 s ^a | 2 | 16,5 | 17,0 | 103 | - | - | - |
| FM | 2 s | 2 | 18,1 | 7,9 | 43 | - | - | - |
| RM | 2 s | 1,5 | 12,2 | 5,1 | 42 | - | - | - |
| BT | 4 s | 10 | 11,8 | 0,9 | 7 | 0,047 | 0,008 | 16 |
| EG | 4 s | 11,5 | 35,5 | 12,7 | 36 | 0,290 | 0,230 | 82 |
| ET | 4 s | 10,5 | 13,3 | 3,1 | 23 | 0,073 | 0,027 | 37 |
| FM | 2 s | 10 | 60,0 | 28,7 | 48 | 0,380 | 0,340 | 90 |
| IT | 4 s | 11 | 24,7 | 7,1 | 29 | 0,094 | 0,014 | 15 |
| RM | 4 s | 11,5 | 16,0 | 12,5 | 78 | 0,067 | 0,048 | 71 |
| 18 | 13 r ^b | 11,5 | 24,4 | 11,7 | 48 | 0,122 | 0,058 | 33 |
| EG | 16 r | 10,5 | 27,1 | 17,0 | 63 | 0,140 | 0,088 | 61 |
| Gravier expérimental | 5 | 0 | 0,4 | 0,09 | 21 | 0,001 | 0,0002 | 22 |

a. s : sac collecteur (1998-1999)

b. r : contenant rigide (1997-1998)

Tableau 10 Ratio de la masse des particules fines (< 5 mm) sur la masse du gravier expérimental pour les tubes congelés des sections non traitées

| Ruisseau | Couche de profondeur (cm) | N | Temps (mois) | Moyenne | Écart-type | CV (%) |
|----------|---------------------------|---|--------------|---------|------------|--------|
| BT | 0 à 8 | 4 | 10 | 0,039 | 0,015 | 40 |
| | 8 à 16 | 4 | | 0,039 | 0,018 | 46 |
| | 0 à 16 | 4 | | 0,039 | 0,013 | 34 |
| EG | 0 à 8 | 2 | 11,5 | 0,047 | 0,029 | 61 |
| | 8 à 16 | 2 | | 0,056 | 0,051 | 90 |
| | 0 à 16 | 2 | | 0,051 | 0,038 | 76 |
| ET | 0 à 8 | 3 | 10,5 | 0,043 | 0,023 | 53 |
| | 8 à 16 | 3 | | 0,057 | 0,048 | 85 |
| | 0 à 16 | 3 | | 0,053 | 0,028 | 53 |
| FM | 0 à 8 | 1 | 10 | 0,117 | - | - |
| | 8 à 16 | 1 | | 0,021 | - | - |
| | 0 à 16 | 1 | | 0,076 | - | - |
| IT | 0 à 8 | 3 | 11 | 0,087 | 0,015 | 17 |
| | 8 à 16 | 3 | | 0,053 | 0,025 | 47 |
| | 0 à 16 | 3 | | 0,073 | 0,001 | 2 |
| JB | 0 à 8 | 1 | 9,5 | 0,017 | - | - |
| | 8 à 16 | 1 | | 0,095 | - | - |
| | 0 à 16 | 1 | | 0,054 | - | - |
| RM | 0 à 8 | 4 | 11,5 | 0,058 | 0,050 | 86 |
| | 8 à 16 | 4 | | 0,058 | 0,054 | 92 |
| | 0 à 16 | 4 | | 0,058 | 0,051 | 88 |

3.7 Érosion maximale du lit

Une chaîne fixée à une certaine profondeur dans le substrat et tendue verticalement jusqu'à la surface permet de mesurer l'affouillement maximal du lit durant la période de suivi. Lorsque le substrat est érodé, la chaîne d'érosion s'étale dans la direction de l'écoulement sur la nouvelle surface du lit. Un dépôt subséquent de particules ne modifie pas la profondeur maximale atteinte par la chaîne dans l'intervalle entre deux mesures (Lisle et Eads, 1991). La précision et l'exactitude des mesures avec la chaîne d'érosion sont relativement grandes. Dans un lit de gravier, la précision est approximativement égale à la classe de taille dominante des particules du lit (Lisle et Eads, 1991). Considérant le peu d'effort supplémentaire requis, des chaînes d'érosion ont été installées en même temps que les sacs collecteurs. La précision de la mesure est déterminée par la taille des maillons de la chaîne.

La perte des chaînes d'érosion attachées aux sacs a été similaire à celle de ces derniers. Aucune chaîne laissée durant l'été n'a été perdue. Nous avons attaché deux rondelles de métal de 5 cm de diamètre (masse de 50 g) à la base de la chaîne afin de l'empêcher d'être emportée par le courant. Il serait préférable d'en augmenter le diamètre et la masse pour réduire l'erreur causée par le déplacement de la chaîne sous la force du courant.

L'installation de chaîne d'érosion est simple et peu onéreuse. Elle est recommandée afin de connaître l'érosion maximale du lit entre deux échantillonnages des récipients collecteurs.

Conclusion

Notre étude avait pour objectif d'évaluer et de développer différentes techniques permettant de mesurer l'effet de l'aménagement de ponceaux sur la morphologie et la granulométrie du substrat de petits cours d'eau. La méthodologie retenue devait permettre de vérifier si la distance prévue au RNI de 50 m entre un ponceau et une frayère située en aval est adéquate. Nous avons, par conséquent, évalué la faisabilité et la précision de diverses techniques pour mesurer les changements temporels et spatiaux de la profondeur du lit, du volume des bassins, de la granulométrie à la surface et à différentes profondeurs du substrat ainsi que le charriage de fond des particules.

Deux mesures successives des profondeurs du lit à partir d'un ruban étiré entre deux repères fixés sur les berges permettent de détecter l'affouillement ou la déposition de particules à chaque point de mesure lorsque la profondeur change de plus de 10 mm ou pour le profil transversal lorsque la profondeur moyenne change de plus de 4 mm. Cette précision apparaît adéquate compte tenu que la variabilité naturelle annuelle du niveau du lit en un point dans les biefs témoins est aussi de l'ordre de 10 mm. Le profil transversal permet aussi de détecter l'érosion des berges lorsqu'elles se déplacent de plus de 10 mm. Il est recommandé de noter la nature du lit à chaque point de mesure de la profondeur lors du premier relevé, afin de prendre les mesures subséquentes au même point et d'évaluer les changements. Ainsi, la mesure de cinq profils transversaux dans un bief témoin en amont permet, par comparaison avec la profondeur du lit dans cinq profils ou plus en aval du ponceau, de détecter les changements de la topographie du lit attribuable à l'aménagement de cet ouvrage. La précision de la mesure du volume des bassins, obtenue à partir de mesures de profondeur, est semblable à celle du profil transversal. Cependant, dans les petits cours d'eau le faible nombre de bassins et leur répartition inégale rendent cette mesure peu appropriée pour évaluer l'effet de l'aménagement des ponceaux.

La granulométrie de la surface du lit est très pertinente pour les évaluations à caractère biologique comme la détermination de la présence ou de l'absence d'une frayère potentielle. La granulométrie de la surface du lit peut être évaluée adéquatement par le prélèvement de 100 particules (décompte des particules). La taille de cet échantillon correspond à ceux de la littérature consultée et la technique permet de suivre la dynamique de la proportion de particules fines. Il est recommandé d'employer le même observateur pour les mesures successives parce que le biais systématique induit par l'opérateur devient rapidement significatif lorsqu'on augmente la taille de l'échantillon. En milieu naturel, une variation relative moyenne de 21 % sur la proportion de particules fines à la surface du lit a été observée après une période de un an. Il faudra évidemment observer des variations bien supérieures pour les attribuer à l'effet du ponceau. La granulométrie de la surface du lit obtenue par le décompte des particules paraît plus appropriée pour détecter les zones relativement permanentes d'affouillement plutôt que celles de dépôts de particules. Les particules fines déposées sont facilement éliminées de la surface du substrat lors des crues. La déposition doit donc être détectée par une méthode qui permet de mesurer les particules fines retenues dans le substrat. La mesure de la granulométrie de la strate supérieure du lit (0 à 8 cm) par la méthode des carottes congelées possède une précision semblable à celle du décompte des particules (CV de 27 %), mais sa mise en œuvre est beaucoup plus laborieuse, en plus de perturber une proportion relativement élevée du substrat dans les petits cours d'eau.

L'indice de transport par charriage de fond mesuré à l'aide de sacs collecteurs ou de contenants rigides a permis de détecter le transport de sédiments, même si ces derniers ne sont plus visibles en surface après le passage des crues. L'utilisation de contenants rigides est davantage recommandée, car il est possible d'installer dix contenants rigides (10-15 cm en hauteur) avec les mêmes efforts que demande l'enfouissement de deux à quatre sacs collecteurs, tout en obtenant une précision comparable et un meilleur échantillonnage. Pour éviter la perte de contenants par le courant, il est préférable de les ancrer au substrat. Les contenants devraient être disposés sur deux rangées alignées transversalement par rapport

au courant afin de tenir compte de la grande variabilité du charriage de fond. Ils devraient également être situés sur des lits de fraie qui présentent les mêmes conditions d'écoulement dans tous les biefs d'un même cours d'eau.

Enfin, l'érosion maximale du lit entre deux mesures des profondeurs ou du charriage de fond est facilement mesurable par l'installation de chaînes d'érosion. La précision de cette mesure correspond à la dimension des maillons de la chaîne.

Parmi les techniques évaluées, le profil transversal, la chaîne d'érosion, la granulométrie de la surface du lit obtenue par le décompte des particules et la mesure d'un indice de transport par charriage de fond par captage des particules dans des récipients rigides à parois perforées sont celles que nous préconisons. Dans un contexte de fonds limités, nous recommandons d'utiliser en premier lieu les collecteurs mis au point par Bio Innoce inc., soit des récipients rigides perforés munis d'un dispositif de fermeture des trous lors de la récolte et bien ancrés dans le substrat. L'installation de chaînes d'érosion afin de connaître l'érosion maximale du lit entre deux mesures dans les récipients collecteurs est aussi recommandée.

Annexe A Description des unités de paysages régionaux et localisation des cours d'eau dans les systèmes de classification des unités de paysages régionaux (Robitaille et Saucier, 1998) et écologiques du territoire (Grondin *et al.*, 1996)

| Ruisseau | BT – ET – FM – JB | EG – RM – 18 | IT |
|---|--|--|---|
| Unité de paysage régional | Lac Batiscan et Lac des Martres | Lac Jacques-Cartier | Lac Rouvray |
| Altitude moyenne (m) | 640 | 851 | 530 |
| Pente moyenne (m) | 23 | 15 | 10 |
| Amplitude moyenne (m) | 260 | 153 | 106 |
| Dénivellation absolue (m/km) | 152 | 102 | 94 |
| Substrat rocheux | crystallin et composé de roches ignées et métamorphiques | crystallin et composé de roches ignées avec peu de métamorphiques (gneiss) | crystallin et composé de roches métamorphiques (gneiss) avec peu d'ignées |
| Dépôt de surface (% d'occupation de l'unité) | till épais : 44 till mince : 30 roc : 14 | till épais : 63 till mince : 19 roc : 1 | till épais : 43 till mince : 31 roc : 6 |
| Relief | Monts | Hautes collines | Collines et hautes collines |
| Température annuelle moyenne (°C) | 0,0 à 1,0 ^a | 0,0 à -2,5 | -2,5 à 0,0 |
| Degrés-jours de croissance (°C) | 1600 à 2600 | < 1600 | 1600 à 1800 |
| Longueur de la saison de croissance (jours) | 140 à 150 | 130 à 140 | 140 |
| Précipitation annuelle moyenne (mm) | 900 à 1600 | 1000 à 1600 | 1000 à 1300 |
| Couvert neigeux (cm) / Fraction nivale (%) | 300 à 500 / 30 à 40 | 400 à 550 / 35 à 40 | 300 à 400 / 30 à 35 |
| Ruisseau | ET | BT – FM – JB – EG – RM – 18 | IT |
| Domaine bioclimatique | Sapinière à bouleau jaune, sous-domaine de l'est - (6c) | Sapinière à bouleau blanc, sous-domaine de l'est - (8f) | Sapinière à bouleau blanc, sous-domaine de l'ouest- (8h) |

a. Grondin *et al.*, 1996

Annexe B Caractéristiques topographiques des ruisseaux à l'étude

| Caractéristique | Ruisseau | | | | | | | |
|---|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| | BT | EG | ET | FM | IT | JB | RM | 18 |
| Aire du bassin (ha) | 95,6 | 828,2 | 165,6 | 267,6 | 139,2 | 626,6 | 168,4 | 52,0 |
| Débit de récurrence de 10 ans Q_{10} ($m^3 \cdot s^{-1}$) | 1,8 | 8,8 | 2,8 | 4,4 | 0,9 | 5,8 | 2,3 | 1,9 |
| Dimensions au niveau de pleins-bords | | | | | | | | |
| Largeur (m) | 2,47 | 4,77 | 2,56 | 3,02 | 2,50 | 4,34 | 2,30 | 2,9 |
| Profondeur (m) | 0,20 | 0,26 | 0,20 | 0,22 | 0,19 | 0,50 | 0,37 | 0,25 |
| Pente de la section étudiée (%) | 3,5 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 0,7 | 0,4 | 0,03 | 1,6 |
| Particules fines < 5mm (% masse sèche) | 33 | 35 | 34 | 28 | 54 | 43 | 100 | 30 |

Annexe C Date d'installation des dispositifs, de construction des ponceaux et de récoltes des données

| Ruisseau | Installation dispositif | Construction ponceau | Récolte saison | Durée (mois) | Récolte saison | Durée (mois) |
|--|----------------------------|----------------------------------|-----------------------|--------------|----------------|--------------|
| Essais de contenants à parois rigides et orifices de 5 mm | | | | | | |
| EG | 9-11/09/97 | - | - | - | 13/08/98 | 10,5 |
| 18 | 4-6/08/97 | - | - | - | 13/07/98 | 11,5 |
| Mesures ou récoltes des profils transversaux, carottes congelées, sacs collecteurs et tubes congelés | | | | | | |
| BT | 26-31/08/98 | 01/09/98 | 10/11/98 [†] | 2,5 | 28-30/06/99 | 10 |
| EG | 13-22/07/98 | Sem. 03/09/98 CS [‡] | 22-25/09/98 | 2 | 06-09/07/99 | 11,5 |
| ET | 27-30/06/98 | aucun | - | - | 18-20/05/99 | 10,5 |
| FM | 04-14/08/98 | 14/09/98 CS | 12-15/10/98 | 2 | 15-18/06/99 | 10 |
| IT | 23-26/06 et 06-09/07/98 | Sem. 03/08/98 | - | - | 2-5/06/99 | 11 |
| JB | 29/09-06/10/98 | 14/06/99 CS | - | - | 13-16/07/99 | 9,5 |
| RM | 28/07-01/08/98 | Sem. 15/08/98 CS | 15-18/09/98 | 1,5 | 20-23/07/99 | 11,5 |

[†] Profils transversaux seulement

[‡] CS : indique que le ponceau a été construit et stabilisé rapidement selon les normes.

Bibliographie

- ADAMS, J.M. et R.L. BESCHTA, 1980. « Gravel bed composition in Oregon coastal streams », *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, vol. 37, p. 1514-1521.
- ADAMS, T. et D. HOOK, 1993. *Implementation and effectiveness monitoring of forestry best management practices on harvested sites in South Carolina*, South Carolina Forestry Commission, Columbia, SC, Best Management Practices Monitoring Report, n° BMP- 1, 32 p.
- ANDERSON, L. et M. BRYANT, 1980. *Fish passage at road crossings : An annotated bibliography*, USDA For. Serv., Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, Portland, Oregon, Gen. Tech. Rep., PNW-117, 10 p.
- BESCHTA, R.L. et W.S. PLATTS, 1986. « Morphological features of small streams : significance and function », *Wat. Ressour. Bull.*, vol. 22, p. 369-379.
- BIO INNOVE INC., 2001. *Le SÉDIBAC : un nouvel outil pour mesurer les apports de sédiments dans l'habitat des poissons*, Charlesbourg, Québec, 4p.
- BJORNN, T.C., M.A. BRUSVEN, M.P. MOLNAU, J.H. MILLIGAN, R.A. KLAMT, E. CHACHO et C. SCHAYE, 1977. « Transport of granitic sediment in streams and its effects on insects and fish. Forest, Wildlife and Range Experiment Station », *Univ. Idaho Bull*, vol. 17, 43 p.
- BOIVIN, J., 1998. Communications personnelles, Québec, gouvernement du Québec, Société de la Faune et des Parcs du Québec.
- BOUDREAULT, A., 1984. *Méthodologie utilisée pour la photo-interprétation des rivières à saumon de la Côte-Nord*, Loretteville (Québec), ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, Direction de la faune aquatique, 26 p.
- BRUSH, L.M., 1961. *Drainage basins, channels, and flow characteristics of selected streams in central Pennsylvania*, US, Geological Survey Professional Paper, 282-F.
- CARLING, P.A. et N.A. READER, 1981. « A freeze-sampling technique suitable for coarse river bed-material », *Sediment. Geol.*, vol. 29, p. 233-239.
- CARLINE, R.F., 1980. « Notes : Features of successful spawning site development for brook trout in Wisconsin ponds », *Trans. Amer. Fish. Soc.*, vol. 109, p. 453-457.
- DAVIES, P.E. et M. NELSON, 1993. « The effect of steep slope logging on fine sediment infiltration into the beds of ephemeral and perennial streams of the Dazzler Range, Tasmania, Australia », *J. Hydrol.*, vol. 150, p. 481-504.
- DEENIHAN, P. et T.E. LISLE, 1988. *DEBRIS : a computer program for analysing channel cross sections*, USDA For. Serv., Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Berkeley, CA., Research Note n° PSW-396, 4 p.
- DELISLE, S. et M. DUBÉ, 2001. « Construction de ponceaux en forêt: un nouvel outil pour en évaluer l'impact sur le milieu aquatique », *Info Forêt*, n° 69, p. 4-5.
- DULUDE P. et A. VALLIÈRES, 1992. Données non publiées, Québec, gouvernement du Québec, ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction régionale de Québec, Service de l'aménagement et de l'exploitation de la faune.
- DUNNE, T. et L.B. LEOPOLD, 1978. *Water in environmental planning*, W.H. Freeman and Company, San Francisco, 818 p.

- EVEREST, F.H., C.E. McLEMORE et J.F. WARD, 1980. *An improved tri-tube cryogenic gravel sampler*. Portland, Oregon, USDA, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, Research note n° PNW-350, 8 p.
- GORDON, N.D., T.A. MCMAHON et B.L. FINLAYSON, 1992. *Stream hydrology : an introduction for ecologist*, Toronto, Canada, John Wiley & Sons.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, 1996. « Règlement sur les normes d'intervention dans les forêts du domaine public », c. F-4.1, r. 1.001, décret 1627-88 modifié par les décrets 911-93 du 22 juin 1993 et 498-96 du 24 avril 1996, *Gazette officielle du Québec*, 8 mai 1996, p. 2750-2786.
- GRANT, G.E., F.J. SWANSON et M.G. WOLMAN, 1990. « Pattern and origin of stepped-bed morphology in high-gradient streams, Western Cascades, Oregon », *Geol. Soc. of Am. Bull.*, vol. 102, 340-352.
- GRONDIN, P., C. ANSSEAU, L. BÉLANGER, J.-F. BERGERON, Y. BERGERON, A. BOUCHARD, J. BRISSON, L. DE GRANPRÉ, G. GAGNON, C. LAVOIE, G. LESSARD, S. PAYETTE, P.J.H. RICHARD, J.-P. SAUCIER, L. SIROIS et L. VASSEUR, 1996. *Écologie forestière. Chapitre 3 : Manuel de foresterie*, Québec, Presse de l'Université Laval, OIFQ, p. 133-279.
- HARTMAN, G.F. et J.C. SCRIVENER, 1990. « Impacts of forestry practices on a coastal stream ecosystem », Carnation Creek, British Columbia. Department of Fisheries and Ocean, *Can. Bull. of Fish. and Aqua. Sci.*, vol. 223, 148 p.
- HAUSLE, D.A. et D.W. COBLE, 1976. « Influence of sand in redds on survival and emergence of brook trout (*Salvelinus fontinalis*) », *Trans. Amer. Fish. Soc.*, vol. 1, p. 57-63.
- HEWLETT, J.D. et L. PIENAAR, 1973. « Design and analysis of the catchment experiment », *Proc. Symp. on the uses of small watersheds in determining effects of forest land use on water quality*, E.D. White (Ed.), p. 88-106.
- HEY, R.D. et C.R. THORNE, 1983. « Accuracy of surface samples from gravel bed material », *J. hydrol. eng.*, vol. 109, p. 842-851.
- KELLER, E.A., 1971. « Pools, riffles, and meanders : Discussion », *Geol. Soc. Am. Bul.*, vol. 82, p. 279-280.
- KELLER, E.A. et W.N. MELHORN, 1978. « Rhythmic spacing and origin of pools and riffles », *Geol. Soc. Am. Bull.*, vol. 89, p. 726-730.
- KELLERHALS, R. et D.I. BRAY, 1971. « Sampling procedures for coarse fluvial sediments », *Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers*, vol. 97 (HY8), p. 1165-1180.
- KING, R. et J. POTYONDY, 1993. « Statistically testing Wolman Pebble counts : changes in percent fines », *Stream Notes*, October 1993, p. 3-6.
- KONDOLF, G.M., 1997. « Application of the pebble count : notes on purpose, method, and variants », *J. Amer. Wat. Res. Ass.*, vol. 33, p. 79-87.
- LISLE, T.E., 1982. « Effects of aggradation and degradation on riffle-pool morphology in natural gravel channels, northwestern California », *Wat. Resour. Res.*, vol. 18, p. 1643-1651.
- LISLE, T.E., 1987. *Using "residual depths" to monitor pool depths independently of discharge*, Berkley, CA, USDA For. Serv., Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Research Note n° PSW-394, 4 p.

- LISLE, T.E., 1989. « Sediment transport and resulting deposition in spawning gravels, North Coastal California », *Wat. Resour. Res.*, vol. 25, p. 1303-1319.
- LISLE, T.E. et R.E. EADS, 1991. *Methods to measure sedimentation of spawning gravels*, Berkeley, California, USDA For. Serv., Pacific Southwest Research Station, Note n° PSW-411, 7 p.
- LOTSPEICH, F. B. et F.H. EVEREST, 1981. *A new method for reporting and interpreting textural composition of spawning gravel*, USDA, For. Serv., Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, Research note n° PNW-369, 11 p.
- LOTSPEICH, F.B. et B.H. REID, 1980. « Tri-tube freeze-core procedure for sampling stream gravels », *The Progressive Fish-Culturist*, vol. 42, p. 96-99.
- MACDONALD, L.H., E.E. WOHL et S. MADSEN, 1997. *Validation of water yield thresholds on the Kootenai National Forest*, Libby, M.T., The Kootenai National Forest, 197 p.
- MACDONALD, L.H., A.W. SMART et R.C. WISSMAR, 1991. *Monitoring guidelines to evaluate effects of forestry activities on streams in the Pacific Northwest and Alaska*, US EPA, Center for Streamside Studies, College of forestry and College of Ocean and Fishery Sciences, n° EPA/910/9-91-001, p. 98-132.
- MAILLOUX, L., A.P. PLAMONDON et D. LÉVESQUE, 2000. *La sensibilité du substrat de frai aux changements du débit dans les petits cours d'eau*, Centre de recherche en biologie forestière, Faculté de foresterie et de géomatique, Université Laval, 56 p.
- MARCUS, W.A., S.C. LADD et J.A. STOUGHTON, 1995. « Pebble counts and the role of user-dependent bias in documenting sediment size distributions », *Wat. Resour. Res.*, vol. 31, p. 2625-2631.
- MCNEIL, W.J. et W.H. AHNELL, 1960. *Measurement of gravel composition of salmon stream beds*, Seattle, WA, Fish. Res. Inst., University of Washington, Circ. 120, 7 p.
- MONTGOMERY, D.R. et J.M. BUFFINGTON, 1993. *Channel classification, prediction of channel response and assessment of channel condition*, Olympia, Washington, Timber, Fish, and Wildlife Agreement, Department of Natural Resources, TFW-SH10-93-002, 84 p.
- MOSLEY, M.P. et D.S. TINDALE, 1985. « Sediment variability and bed material sampling in gravel-bed rivers », *Earth Surf. Processes and Landforms*, vol. 10, p. 465-482.
- OLSON-RUTZ, K.M. et C.B. MARLOW, 1992. « Analysis and interpretation of stream channel cross-sectional data », *North Amer. J. Fish. Manag.*, vol. 12, p. 55-61.
- PLATTS, W.S., W.F. MEGAHAN et G.W. MINSHALL, 1983. *Methods for evaluating stream, riparian, and biotic conditions*, Ogden, UT, United States Department of Agriculture, Forest Service, Gen. Tech. Report., n° INT-138, 71 p.
- POTYONDY, J.P. et Y.T. HARDY, 1994. « Use of pebble counts to evaluate fine sediment increase in stream channels », *Water Res. Bull.*, vol. 30, p. 509-520.
- RAY, G.A. et W.F. MEGAHAN, 1979. *Measuring cross sections using a sag tape : a generalised procedure*, Ogden, Utah, USDA For. Serv., Intermountain Forest and Range Experiment Station., Gen. Tech. Rep., n° INT-47, 12 p.
- ROBITAILLE, A. et J.-P. SAUCIER, 1998. *Paysages régionaux du Québec méridional*, Les Publications du Québec, 214 p.

- ROSGEN, D.L., 1996. *Applied river morphology : Wildland Hydrology*, Pagosa Springs, Colorado, 360 p.
- RYAN, S.E. et C.A. TROENDLE, 1999. « Measuring Bedload with Handheld Samplers in Coarse-Grained Mountain Channels », *Stream Notes*, July 1999, p. 1-4.
- RYAN, P., 1970. *Design and operation of an in situ frozen core gravel sampler*, Can. Dept., Fish. For. Fish. Serv., Pacific Region, Tech. Rep., 12 p.
- SCRIVENER, J.C. et M.J. BROWNLEE, 1989. « Effects of forest harvesting on spawning gravel quality and incubation survival of chum (*Oncorhynchus keta*) and coho salmon (*O. kisutch*) in Carnation Creek, British Columbia », *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, vol. 46, p. 681-696.
- SHIRAZI, M.A. W.K. SEIM et D.H. LEWIS, 1981. « Salmon-spawning gravel : A renewable resource in the Pacific Northwest? ». State of Washington Water Research Centre, Washington State University and the University of Washington, Washington, *Proceedings from the conference*, vol. 39, p. 227-278.
- SPILLIOS, L.C. et R.L. ROTHWELL, 1998. « Freeze-core sampling for sediment intrusion from road stream crossings in Alberta's foothills : a preliminary discussion. », *M.K. Brewin and D.M.A. Monita, tech. coords. Forest-fish conference : land management practices affecting aquatic ecosystems. Proc. Forest-fish Conf., May 1-4, 1996*, Calgary, Alberta, Can. For. Serv., North. For. Cent., Information report NOR-X-356, p. 445-450.
- STOCKER, Z.S. et J. DUDLEY WILLIAMS, 1972. « A freezing core method for describing the vertical distribution of sediment in a streambed », *Limnol. Oceanogr.*, vol. 17, p. 136-138.
- WALKOTTEN, W.J., 1973. *A freezing technique for sampling streambed gravel*, USDA, For. Serv., Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, Portland, Oregon, n° PNW-205, 8 p.
- WALKOTTEN, W.J., 1976. *An improved technique for freeze sampling streambed sediments*, Portland, Oregon, USDA For. Serv., Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, Research Note, n° PNW-281, 12 p.
- WATERS, T.F., 1995. *Sediment in streams: Sources, biological effects, and control*, Maryland, American Fisheries Society, 251 p.
- WESCHE, T. A., D.W. REISER, V.R. HASFURTHER, W.A. HUBERT et Q.Q. SKINNER, 1989. New technique for measuring fine sediment in streams, *North Amer. J. Fish. Manag.*, vol. 9, p. 234-238.
- WIGHAM, J.M., 1972. « Transport de sédiments-Chapitre 11 », *Manuel des principes d'hydrologie*, Ottawa, D.M. Gray, Ed., Conseil National de la Recherche du Canada, 28 p.
- WOHL, E.E., D.J. ANTHONY, S.W. MADSEN et D.M. THOMPSON, 1996. « A comparison of surface sampling methods for coarse fluvial sediments », *Wat. Resour. Res.*, vol. 32, p. 3219-3226.
- WOLMAN, M.G., 1954. « A method of sampling coarse river-bed material », *Trans. Amer. Geophysical Union*, vol. 35, p. 951-961.
- YANG, C.T., 1971. « Formation of riffles and pools », *Wat. Resour. Res.*, vol. 7, p. 1567-1574.
- YOUNG, M.K., W.A. HUBERT et T.A. WESCHE, 1991. « Biases associated with four stream substrate samplers », *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, vol. 48, p. 1882-1886.