

Centre Eau, Terre et Environnement

**FRANCHISSEMENT PISCICOLE DANS LES PONCEAUX : OUVRAGES
A SIMULATION DE COURS D'EAU ET CONCEPTION
ICHTYOCOMPATIBLE**

Alexandre Piroolley et Normand E. Bergeron

19/06/2020

Organisme Bénéficiaire

Pêche et Océans Canada
K. Bertolin
343 Université avenue
Mocton NB, EC 9B6

N° de référence du client

F4753-190012

N° du contrat

F5211-190698



**Pêches et Océans
Canada**

© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2021
Tous droits réservés

ISBN : 978-2-89146-955-5 (version électronique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2021
Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2021

RÉSUMÉ

Ce document constitue une revue de littérature des différentes caractéristiques de ponceaux employés à ce jour et leur impact vis-à-vis du franchissement piscicole. Réalisé en collaboration avec le Ministère des Pêches et des Océans, une sélection des thématiques abordées a volontairement été effectuée, compte tenu de l'étendue de la littérature sur le sujet.

Cette synthèse contextualise les enjeux associés à la préservation des milieux aquatiques lors de leur conception et de leur mise en œuvre. Deux catégories de conception sont abordées : les ponceaux à simulations de cours et les ponceaux à conception hydraulique (refoulement et cloisons). La simulation de cours d'eau concerne les ouvrages qui favorisent un franchissement piscicole non sélectif en imitant la morphologie et donc les conditions hydrauliques naturellement présentes dans le cours d'eau. La conception hydraulique s'avère quant à elle plus sélective. Il s'agit en effet d'adapter les conditions hydrauliques dans l'ouvrage, par le biais de différentes structures, aux capacités de nage de certaines espèces cibles.

Pour chacune de ces catégories, une mise au point est effectuée sur le principe de conception et l'efficacité de ces dispositifs. Les éléments présentés sont applicables aux nouveaux ponceaux ainsi qu'au remplacement et à l'aménagement de ponceaux déjà existants. A noter que les considérations associées aux ouvrages à portée libres (ponts et passerelles) ne sont pas abordées dans ce document.

Cette collecte de donnée a pour objectif la mise en évidence des avancées de recherche en la matière et d'établir une base de réflexion dans la définition des projets de restauration du franchissement piscicole. Les lacunes dans la littérature, au regard des aspects d'intérêt, et les perspectives de recherche futures sont également soulignées.

ABSTRACT

Fish passage is a topic well documented in the literature and a preliminary selection of research papers was conducted to compile material that would meet the Fisheries the Fisheries and Oceans Canada needs. This document hence synthesizes the latest research available on varied culvert characteristics and their known impacts on fish passage.

This summarizes the main issues associated to aquatic environments conservation during culvert design and construction. Both stream simulation culvert design and hydraulic culvert design (backwatering and baffles) are presented. On the one hand stream simulation design is non-selective and ensures fish passage for all kind of species by matching the natural channel conditions. On the other hand, the hydraulic design is known to be more selective. The hydraulic structures inside the culverts are specifically designed to meet species specific leap or swim capacities.

Each chapter details the design requirements and efficiencies of the two categories. Design elements discussed in the document be applied for both replacement and new culverts. It should be noted that bridges are not included in the present review considering their potential to preserve stream and flood plain processes.

The objective of this literature review is to help project stakeholders understanding pros and cons of specific culvert designs and implementing the right solutions to promote fish passage at road crossings. The potential for future research needs are presented eventually.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	II
ABSTRACT	III
TABLE DES MATIÈRES	V
LISTE DES FIGURES	VII
LISTE DES TABLEAUX	IX
GLOSSAIRE	XI
LISTE DES ABRÉVIATIONS	XIII
1.1 IMPACTS MORPHOLOGIQUES	1
1.2 IMPACTS BIOLOGIQUES	2
1.3 LES DIFFERENTS TYPES D'OUVRAGES	4
1.4 FORMES EMPLOYEES POUR LA CONCEPTION DES PONCEAUX	4
1.5 MATERIAUX EMPLOYES POUR LA CONCEPTION DES PONCEAUX.....	6
2 IMPACTS ET DEVENIR DES PONCEAUX	7
2.1 DEFAILLANCE DES PONCEAUX	7
2.2 REPARATIONS ET REMPLACEMENT D'OUVRAGES.....	10
2.2.1 <i>Réparation d'ouvrages</i>	10
2.2.2 <i>Remplacement d'ouvrages</i>	11
2.3 IMPACTS SUR LES MILIEUX AQUATIQUES RELATIFS A L'INSTALLATION DE PONCEAUX.....	12
2.3.1 <i>Impacts à court terme</i>	12
2.3.2 <i>Impacts à moyen et long termes</i>	15
3 PONCEAUX A SIMULATION DE COURS D'EAU	19
3.1 LE CONCEPT DE SIMULATION DE COURS D'EAU	19
3.2 UN CONCEPT, DEUX APPROCHES : OUVRAGES OUVERTS A FOND LIBRE OU FERMES SURDIMENSIONNES	22
3.2.1 <i>Ouvrages à fond libre</i>	22
3.2.2 <i>Ponceaux à contours fermés surdimensionnés</i>	24
3.3 CONSIDÉRATIONS COMMUNES AUX DEUX TYPES D'OUVRAGES QUANT À LA STABILITÉ DU MATELAS SÉDIMENTAIRE	26
3.4 CONSIDERATIONS COUTS – BENEFICES.....	27
4 AUTRES TECHNIQUES D'AMENAGEMENT	32
4.1 PONCEAUX A REFOULEMENT	32
4.2 PONCEAUX A CLOISONS	34
4.3 CONSIDERATIONS TECHNIQUES RELATIVES AU TRANSIT DES SEDIMENTS ET DES EMBACLES	39
4.3.1 <i>Ponceaux à refoulements</i>	39

4.3.2	<i>Ponceaux à cloisons</i>	40
5	RECOMMANDATIONS	43
6	BIBLIOGRAPHIE	45

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.1	FORMES USUELLES DE PONCEAUX (INSPIRE DE SCHALL ET AL. 2012).....	5
FIGURE 2.1	FORMES USUELLES DE PONCEAUX (INSPIRE DE SCHALL ET AL. 2012).....	9
FIGURE 2.2	POSITIONNEMENT D'UN PONCEAU AUX ABORDS D'UNE RUPTURE DE PENTE – IMPACTS SUR LE RISQUE D'INCISION ET DE SEDIMENTATION (ISSU DE PECHE ET OCEANS 2016).....	16
FIGURE 3.1	COUPE EN TRAVERS TYPE D'UN PONCEAU A FOND LIBRE DE CONCEPTION SIMULATION DE COURS D'EAU (ISSU DE PECHE ET OCEANS 2016).....	22
FIGURE 3.2	COUPE EN TRAVERS (HAUT) ET PROFIL EN LONG (BAS) D'UN PONCEAU SURDIMENSIONNE DE CONCEPTION SIMULATION DE COURS D'EAU (ISSU DE MINISTERE DES TRANSPORTS DU QUEBEC 2019)	24
FIGURE 3.3	PONCEAU A SIMULATION DE COURS D'EAU ET PONCEAUX DE DEBORDEMENT DANS LA PLAINE D'INONDATION (ISSU DE GUBERNICK ET AL. 2008)	27
FIGURE 4.1	PROFIL EN LONG D'UN PONCEAU A REFOULEMENT NON CONFORME (ISSUS DE MINISTERE DES TRANSPORTS 2019)	32
FIGURE 4.2	PROFIL EN LONG TYPE D'UN PONCEAU A REFOULEMENT AVEC MISE EN PLACE D'UNE CLOISON DE RETENTION EN AMONT DE L'OUVRAGE (ISSU DE PAROLA 2008)	34
FIGURE 4.3	PROFIL EN LONG TYPE D'UN PONCEAU A DEVERSOIRS (ISSU DE MINISTERE DES TRANSPORTS 2019)	35
FIGURE 4.4	DIMENSIONNEMENT TYPE DE CLOISONS OFFSET (ISSU DE LARINIER 2002).....	36
FIGURE 4.5	PONCEAU EQUIPE DE CLOISONS LATERALES (ISSU DE O'CONNOR 2017)	36
FIGURE 4.6	TYPES DE DEFLECTEURS POUVANT ETRE INSTALLES DANS UN PONCEAU (ISSUS DE MINISTERE DES TRANSPORTS DU QUEBEC 2019).....	37

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 2.1	DUREE DE VIE ASSOCIEE AUX PONCEAUX	9
TABLEAU 3.1	ÉPAISSEUR DU MATELAS SEDIMENTAIRE RECOMMANDE DANS LES PONCEAUX A SIMULATION DE COURS D'EAU EN CONTOUR FERME	25
TABLEAU 3.2	ANALYSE MULTICRITERES DES DIFFERENTS TYPES DE PONCEAUX A SIMULATION DE COURS D'EAU	30
TABLEAU 4.1	ÉPAISSEUR DU MATELAS SEDIMENTAIRE RECOMMANDE DANS LES PONCEAUX A SIMULATION DE COURS D'EAU EN CONTOUR FERME	37

GLOSSAIRE

Batardeau : Barrage provisoire permettant la mise à sec d'un site de travaux en milieu aquatique.

By-pass : Dispositif permettant de maintenir la continuité des écoulements pendant la réalisation de travaux. Il peut être constitué d'un ponceau ou d'une déviation du cours d'eau.

Crue centennale : Crue dont la période de retour équivaut à 100 ans. La probabilité que le débit de la crue soit atteint ou dépassé chaque année est de 0.01.

Embâcle : Accumulation de débris, flottants ou non, transportés par le cours d'eau.

Engrèvement : Accumulation de sédiments dans un dispositif hydraulique.

Fosse de dissipation : Zone d'érosion formée par la dissipation d'énergie en aval d'un ouvrage hydraulique.

Frayère : Lieu de reproduction des poissons et autres organismes aquatiques.

Largeur plein-bord : Correspond à largeur du lit limite au-delà de laquelle l'eau se répand dans la plaine d'inondation du cours d'eau.

Ordre d'un cours d'eau : Système de classification permettant de définir le positionnement d'un cours d'eau dans un réseau hydrographique. Les zones de sources sont définies par le rang le plus faible, mais l'ordination des cours d'eau suivants varie selon les modalités de classification.

Pression hydrostatique : Pression qu'exerce l'eau sur la surface d'un corps immergé.

Profil en long du lit : Représentation graphique représentant la distance et l'élévation du talweg pour un tronçon ou un cours d'eau donné.

Redan : Ressaut sur une surface horizontale ou verticale. Dans un ponceau, les redans sont principalement formés par une dislocation des différentes sections de celui-ci.

Refoulement : Augmentation du niveau d'eau sous l'influence de l'élévation et de la forme d'une section de contrôle de l'écoulement.

Réseau trophique : Définis l'ensemble des relations alimentaires qui assurent la circulation de la matière et de l'énergie dans un écosystème.

Talweg : Ligne joignant les points les plus profonds du lit d'un cours d'eau.

Vitesse moyenne de l'écoulement : Vitesse obtenue pour un profil en travers donné en divisant le débit par la surface d'écoulement pour cette même section.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

D₅₀, D₈₄, D₉₅, D₁₀₀ : Diamètre correspondant à 50, 84, 95 et 100 % de la fréquence cumulée en nombre, masse ou volume des particules du lit. Le D₅₀ indique que 50 % des particules du lit sont de taille inférieure ou égale à ce diamètre tandis que le D₁₀₀ correspond à la taille des plus grosses particules observables.

MES : Matières en Suspension

PEHD : PolyÉthylène Haute Densité

RP : Ratio de Pente.

TTOG : Tuyau en Tôle Ondulée Galvanisée

1.1 Impacts morphologiques

Le dimensionnement des ponceaux a longtemps été régi par une approche purement hydraulique, à savoir favoriser un écoulement optimal de l'eau en condition de crues¹, sans impacter l'intégrité de l'infrastructure de transport (Parker 2000, Larinier 2002, Jackson 2003). La préservation des fonctionnalités morphologiques et biologiques du cours d'eau a quant à elle été longtemps considérée comme secondaire, que ce soit lors de la conception ou de l'installation (Jackson 2003, Gibson et al. 2005).

Compte tenu de la multitude de ponceaux présents sur le territoire, l'importance de la perte possible d'habitat liée à la présence même de l'ouvrage constitue un facteur non négligeable. En effet, le remplacement des matériaux constitutifs du lit, des berges et de la végétation rivulaire, par une structure artificielle constitue une dégradation directe du milieu. Cette dégradation est par ailleurs reliée au type d'installation employé, à ses dimensions et à la concentration d'ouvrages sur un même cours d'eau (Bates et al. 2003). À ce titre, l'examen de 47 ponceaux sur une portion de route nouvellement créée a permis de quantifier une perte d'habitat d'environ 3 000 m² lors de la construction de l'autoroute Translabrador (Gibson 2005).

Contrairement aux portions de cours d'eau non impactées par un ouvrage, la présence d'un ponceau est généralement synonyme d'une modification des paramètres physiques et hydrauliques du cours d'eau. De nombreuses études ont ainsi permis de dresser un constat exhaustif des perturbations associées à la présence de ponceaux (Warren et al. 1998, Love et al. 2003, Coffman 2005, Gibson et al. 2005, Burford et al. 2009, Bouska et al. 2010). Les perturbations les plus couramment observées sont :

- Un effet de constriction par rapport à la largeur plein bord du chenal,
- Une modification localisée de la pente du cours d'eau,
- La perte de rugosité naturelle,
- L'absence de variabilité dans l'écoulement,
- Une accélération des vitesses d'écoulement,
- Un étalement de la lame d'eau,
- La formation d'une chute aval à l'extrémité aval du ponceau.

¹ Dans de nombreux pays, le dimensionnement des ouvrages hydrauliques doit permettre l'écoulement d'une crue de période retour centennale Q_{100} dans le cadre des ouvrages routiers (Schall et al. 2012, Wyoming Department of Transportation 2011)

En constituant une structure fixe dans un milieu mobile (Makrakis et al. 2012), les ponceaux entraînent une perturbation des processus morphodynamiques pouvant à terme engendrer la perte d'habitats aux abords de l'ouvrage. Bien que la nature et l'ampleur des impacts soient propres à chaque site, les ponceaux favorisent les risques d'incision du cours d'eau ainsi qu'une sédimentation accrue (Pêche et Océans Canada 2016).

En aval de l'ouvrage, l'énergie excédentaire, liée à l'augmentation locale des vitesses d'écoulement, entraîne une plus grande capacité de mobilisation et de transport du substrat. Qu'il soit occasionné par le dimensionnement de l'ouvrage ou le recalibrage du cours d'eau aux abords de celui-ci, ce phénomène favorise la formation d'une fosse de dissipation en pied d'ouvrage, l'érosion des berges ou encore un décapage des particules du substrat les plus mobiles (Bates et al. 2003, Jackson 2003). L'équilibre initial entre érosion et dépôt se retrouve modifié. Il peut alors entraîner à sa suite une incision du lit du cours d'eau.

Un mauvais calage altimétrique de l'ouvrage, synonyme de remplissage sédimentaire temporaire en amont, peut également favoriser ce phénomène d'incision. Du point de vue sédimentaire, il convient de distinguer l'influence des ponceaux sur deux phénomènes : l'apport et le dépôt des particules fines. Les traversées de cours d'eau entraînent souvent un apport accru en sédiments fins, provoqué à la fois par l'installation de l'ouvrage (Bates et al. 2003) puis l'érosion, par ruissellement des précipitations, sur des remblais mal compactés ou faiblement végétalisés (Rothwell 1983, Bérubé et al. 2010). La réduction de largeur au niveau du ponceau, peut occasionner la formation d'un refoulement en amont, principalement observé en condition de hautes eaux. Le ralentissement des écoulements associé à ce refoulement favorise la sédimentation des particules. Il modifie également les propriétés morphologiques du chenal, avec à terme, un risque de déstabilisation du lit (Bates et al. 2003). Un phénomène similaire est observé lorsque l'ouvrage est obstrué par des embâcles de débris végétaux ou de sédiments. En modifiant l'abondance et la qualité des habitats, les perturbations morphodynamiques induites par les ponceaux impactent directement la qualité des frayères, la structure des peuplements ainsi que le réseau trophique.

1.2 Impacts biologiques

La modification des conditions hydrauliques à l'intérieur du ponceau est également susceptible de **perturber directement le franchissement des espèces piscicoles**, et par extension aquatiques (crustacés, amphibiens, etc). Cet effet de blocage peut être partiel ou total, selon qu'il affecte le franchissement d'un stade de développement (juvénile, adulte) de certaines

espèces ou lors de certaines conditions hydrologiques. En fonction des capacités de l'espèce, le ponceau peut être rendu infranchissable par une multitude de facteurs tels que, la présence d'une chute aval de hauteur excessive, une profondeur d'eau insuffisante dans l'ouvrage, des vitesses ou une turbulence trop importantes ou encore la présence d'embâcles. Le morcellement d'un cours d'eau par les ponceaux entraîne le cloisonnement d'un milieu autrefois continu.

La multiplicité des ouvrages routiers et forestiers contribue largement à ce phénomène appelé **fragmentation des habitats**, reconnu comme étant l'une des raisons principales influençant la perte de diversité et d'abondance des communautés de poissons (Fuller et al. 2015 ; Pepino et al. 2012 ; MacPherson et al. 2012). Les mouvements piscicoles jouent un rôle essentiel dans l'accomplissement de leurs cycles biologiques ou en réponse à un événement ponctuel. L'incapacité des espèces à librement circuler dans le cours d'eau peut entraver l'accès aux zones de reproduction, d'alimentation ou d'abris. Le cloisonnement des populations limite les possibilités de croisement entre celles-ci entraînant à terme à la fois une perte de diversité génétique (Morita et al. 2002, Pavlova et al. 2017, Leeuwen et al. 2018) au sein d'une population ainsi qu'une plus grande différenciation entre les populations (Wofford et al. 2005, Torterotot et al. 2014, Nathan et al. 2018). Il en résulte une plus grande vulnérabilité des populations face à l'évolution des conditions environnementales. Ce constat est par ailleurs renforcé par une altération des mécanismes de dispersions/recolonisations (Lucas et al. 2001, Adams et al. 2005) particulièrement important au maintien des populations dans les milieux exposés à une forte variabilité hydrologique. La multiplicité d'ouvrages impactant le franchissement piscicole sur un même réseau hydrographique peut également entraîner des répercussions physiologiques sur les poissons. Ces dernières peuvent se traduire par une diminution de la viabilité des œufs ou encore la mort d'individus par épuisement (Love et al. 2003). L'ensemble de ces constats plaide en faveur d'une gestion concertée à l'échelle des bassins versants afin de caractériser les effets cumulatifs des ponceaux et ainsi favoriser une préservation efficace des espèces, notamment patrimoniales (McKay et al. 2017, Arsenault et al. travaux de maîtrise en cours). Notons enfin que des observations ont également permis d'identifier un accroissement de la prédation animale ou de la pression de pêche en aval des ouvrages, puisqu'ils favorisent une zone de concentration des poissons (Love et al. 2003).

Le maintien des fonctionnalités du cours d'eau est directement lié au type de ponceau et aux précautions prises lors du dimensionnement et de l'installation de celui-ci. En ce sens, il apparaît indispensable de proposer aux décideurs une mise à jour objective des connaissances

relatives aux différents scénarios de dimensionnement et ainsi favoriser le choix de l'aménagement le mieux adapté au contexte d'étude.

1.3 Les différents types d'ouvrages

Parmi la multitude d'aménagements associés aux infrastructures de transport, la conception des traversées de cours d'eau requiert une attention particulière afin de permettre la continuité du réseau de transport tout en garantissant la continuité des écoulements. Selon la nature du projet, deux types majeurs d'infrastructures peuvent être installés : **les ponceaux et les ponts**.

Les ponceaux désignent les ouvrages hydrauliques de formes et matériaux variables, généralement de petite taille, et positionnés sous un remblai.

Contrairement aux ponceaux, les ponts et passerelles désignent les ouvrages ne nécessitant pas la mise en place de remblais. Constitués d'un tablier, de culées et éventuellement de piles (selon la largeur de l'ouvrage), ils permettent de limiter les impacts sur le cours d'eau voir la plaine d'inondation selon les configurations. Bien que non abordés dans le cadre de cette revue de littérature, les ponts constituent un aménagement particulièrement efficient, qui permet de concilier une capacité hydraulique importante et la préservation des fonctionnalités du cours y compris au regard du franchissement piscicole. Les contraintes de dimensionnement, d'installation ainsi que les coûts associés se montrent toutefois prohibitifs pour permettre un emploi généralisé de ces ouvrages.

1.4 Formes employées pour la conception des ponceaux

Avant d'aborder plus en détail les différents principes de dimensionnement et leurs spécificités, il apparaît pertinent de rappeler qu'il existe deux catégories de ponceaux (Pêche et Océans Canada 2016, Hernick et al. 2019) :

Les ponceaux à **contour fermé**, généralement associés aux formes circulaires, rectangulaires, elliptiques ou arquées.

Les ponceaux à **contour ouvert** de type portiques ou arches.

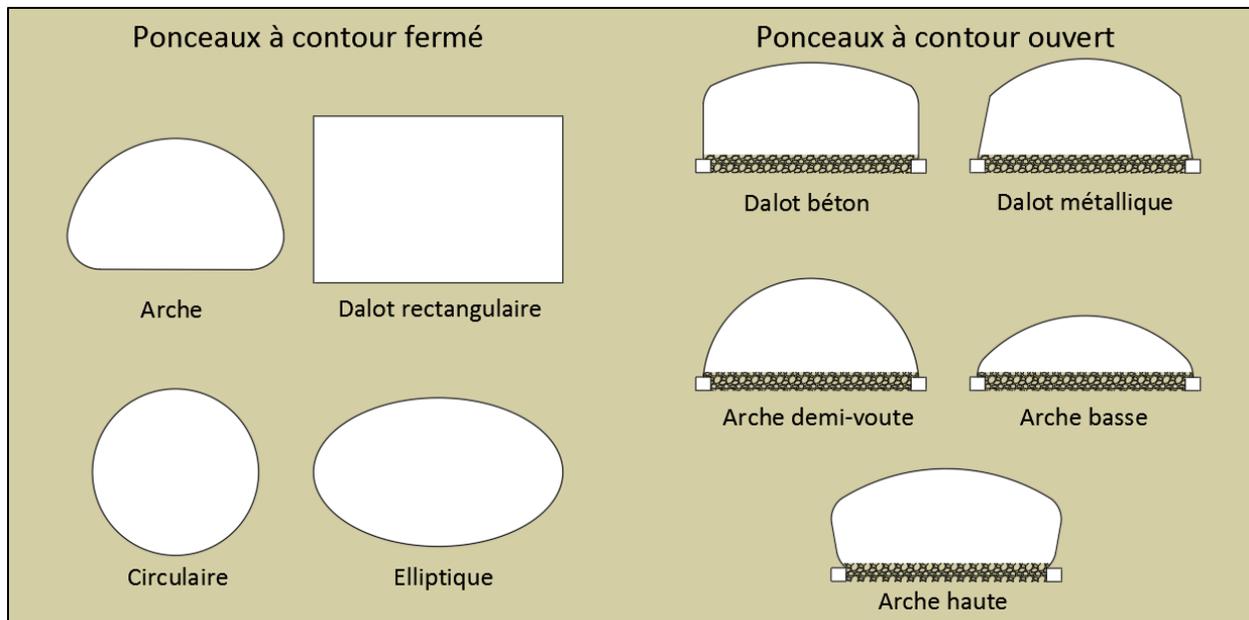


Figure 6.1 Formes usuelles de ponceaux (inspiré de Schall et al. 2012)

Outre les différences de formes et de dimensions, la principale différence entre ces structures réside dans la nature des fondations et des ancrages de l'ouvrage. Contrairement aux ponceaux à contour fermé, les ponceaux à contour ouvert conservent le lit du cours d'eau au sein de l'ouvrage (ouvrages à fond libre) et favorisent donc la conception des ponceaux à simulation de cours d'eau. Leur installation requiert donc un sol non érodable afin de limiter les risques d'affouillement des fondations. Ces aspects sont détaillés plus précisément dans le chapitre 3.2.1.

Plusieurs études se sont intéressées à l'impact des différents types d'ouvrages sur le franchissement piscicole (Warren et al. 1998, Gibson et al. 2005, Benton et al. 2008, Briggs et al. 2013). De manière générale, l'ensemble des ouvrages impacte négativement le franchissement piscicole comparativement à une portion de cours d'eau sans obstacle. Exception faite pour les ouvrages à portées libres ou de taille avoisinant la largeur plein-bord du cours d'eau (Benton et al. 2008). L'efficacité des ponceaux vis-à-vis du franchissement piscicole est toutefois directement reliée à la conception choisie et à la qualité de la mise en œuvre de l'ouvrage (Gibson et al. 2005). La forme de l'ouvrage à elle seule ne constitue donc pas un facteur sélectif vis-à-vis du franchissement piscicole.

1.5 Matériaux employés pour la conception des ponceaux

Tout comme la forme, différents matériaux peuvent être employés. En Amérique du Nord, les matériaux les plus communément préconisés sont les modules en béton préfabriqués (armé ou non), les ouvrages en tôle (TTOG) ou Polyéthylène Haute Densité (PEHD). À noter que les ouvrages TTOG ou PEHD peuvent être lisses ou présenter des ondulations, avec une incidence directe sur la rugosité de la structure.

Pour les considérations hydrauliques et génies civils, le choix du matériau repose sur différentes variables nécessaires au projet telles que le coût, la résistance mécanique de l'ouvrage, la facilité d'installation, la rugosité ou encore la durabilité face aux phénomènes de corrosion et d'abrasion (Schall et al. 2012).

Du point de vue biologique, Goerig et al. (2015) ont mis en évidence que la probabilité de succès dans des ouvrages sans substrats est principalement expliquée par la rugosité de l'ouvrage. Les ponceaux rugueux présentent en effet des écoulements plus complexes et des zones de faibles vitesses plus étendues à proximité des parois, en comparaison aux ouvrages lisses (Richmond et al. 2007, Clark et al. 2014). Ces zones de faibles vitesses sont régulièrement exploitées par les poissons en ascension afin de profiter d'une vitesse inférieure à la vitesse moyenne de l'écoulement et donc limiter leur dépense énergétique (Richmond et al. 2007, Johnson et al. 2012, Watson et al. 2018). Les petits individus peuvent également exploiter le fond des ondulations pour se reposer au cours du franchissement (Goerig et al. 2017, Constantin 2017). L'augmentation de la rugosité dans l'ouvrage et donc des zones de faibles vitesses peut également être réalisée par la mise en place de substrat au sein de l'ouvrage. Ce procédé s'est avéré efficace pour accroître le succès de franchissement de plusieurs espèces (Rodgers et al. 2017, Johnson et al. 2019).

2 IMPACTS ET DEVENIR DES PONCEAUX

2.1 Défaillance des ponceaux

Au même titre que les autres infrastructures hydrauliques, les ponceaux sont soumis à un risque de défaillance susceptible d'impacter le cours d'eau concerné ainsi que la sécurité des biens et des personnes. Compte tenu de la multitude de facteurs capable d'influencer l'intégrité d'un ouvrage, les causes de défaillance des ponceaux sont à la fois variables et complexes à catégoriser (Wissink et al. 2005). Il est communément admis de différencier les causes de défaillance des ponceaux en deux catégories (Lian et al. 2003) :

- **Les causes structurelles** regroupent un ensemble de facteurs relatifs à la nature et la stabilité des fondations, aux risques d'affouillements, à une mauvaise conception, à la détérioration des matériaux ou encore à une surcharge de la structure.
- **Une capacité hydraulique insuffisante** à l'évacuation d'une crue importante. Provoquée par des précipitations intenses ou la fonte des neiges et glaces, une capacité hydraulique insuffisante en période de crues peut entraîner des désordres structurels.

D'un point de vue structurel, le ponceau est exposé à un risque de déformation, d'écrasement ou encore de rupture (Schall et al. 2012). Principalement associées à la présence de vides dans les remblais de l'ouvrage, ces défaillances peuvent résulter d'un défaut de mise en œuvre (matériaux, compaction), mais également d'érosion des matériaux sous et aux abords de l'ouvrage (Schall et al. 2012). La défaillance structurelle de l'ouvrage impacte directement la sécurité de l'installation en se répercutant sur la chaussée, mais également sur les performances hydrauliques de l'ouvrage et peut donc favoriser l'apparition de désordres connexes.

L'altération des profils d'écoulement des ponceaux et donc leur efficacité est également rencontrée en contexte de pergélisol. La circulation d'eau et d'air dans le ponceau favorise en effet un échange thermique avec les parois de l'ouvrage et par extension le sol environnant, modifiant ainsi la structure de celui-ci (Périer et al. 2015). Les échanges de chaleur varient selon la forme de l'ouvrage (Liu et al 2014) avec une température du sol plus élevée observée aux extrémités de celui-ci (Zhang et al. 2007). Cette vulnérabilité des ponceaux nordiques aux déformations est renforcée par le tassement des terrains associé au contexte de réchauffement climatique (L'Hérault et al. 2014).

Une capacité hydraulique insuffisante peut favoriser l'élévation du niveau d'eau amont jusqu'à entrainer une mise en charge de l'ouvrage voir la formation d'écoulement par surverse sur la route (Gassman et al. 2017). L'augmentation de la pression hydrostatique associée à ce phénomène exerce des contraintes supplémentaires sur le talus de la route tout en favorisant une débitance dans l'ouvrage plus élevée et donc un risque de gonflement de l'ouvrage (Gassman et al. 2017). Les surverses sur la chaussée peuvent également entrainer une érosion accrue des talus sur la partie aval favorable à la déstabilisation des remblais et donc de l'ouvrage (Schall et al. 2012).

Dans le cas de défaillances avancées ou d'évènements hydrologiques particulièrement importants, le ponceau peut être arraché, entraînant une menace à la sécurité des usagers, la fermeture de l'axe de transport, mais également la dégradation des milieux aquatiques. Régulièrement associée au manque de maintenance de l'ouvrage, la rupture des remblais et de la chaussée provoque un départ massif de sédiments fins dans le cours d'eau, ainsi que la déstabilisation de la végétation des berges (Gassman et al. 2017, Gilbert et al. 2019). Sur trois ponceaux défaillants diagnostiqués en milieu forestier, les apports de sédiments entraînés dans le cours d'eau par érosion des remblais s'élèvent à plusieurs centaines de mètres cubes par ouvrage (Gilbert K., communication personnelle, 12 juin 2020). Les travaux de Rothrock et al. (2007) ont également permis d'estimer un apport dans le cours d'eau de 2.1 tonnes de sédiments par ponceau/an suite à l'arrachement ou l'érosion des ouvrages.

Notons également que la probabilité de défaillance d'un ouvrage varie en fonction de l'âge de la structure. Les défauts de fabrication des matériaux, d'installation de l'ouvrage ou un sous-dimensionnement de celui-ci entrainent un risque élevé durant les premières années (Najafi 2005) tandis que l'usure des matériaux par différents facteurs environnementaux impacte principalement la structure à mesure de son vieillissement (Schall et al. 2012).

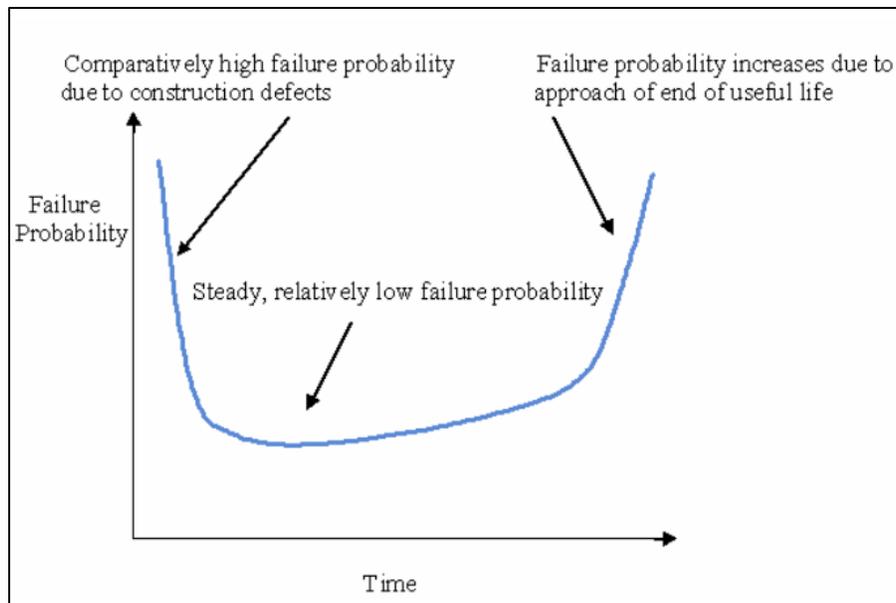


Figure 2.1 Formes usuelles de ponceaux (inspiré de Schall et al. 2012)

Les données répertoriées associées à la durée de vie des différents types de structures ou de matériaux sont présentées ci-dessous.

Tableau 2.1 Durée de vie associée aux ponceaux

Source	Matériaux	Forme	Conception	
			Conventionnelle	Simulation de cours d'eau
NYSDOT 2011	Métallique	Circulaire	25 – 50 ans	Non mentionnée
	Béton	Rectangulaire	70 ans	Non mentionnée
Levine 2013	Métallique	Circulaire	15 -30 ans	Non mentionnée
	Béton	Rectangulaire	50 - 100 ans	Non mentionnée
Gillespie et al. 2014	Métallique	Non mentionné	25 – 50 ans	50 – 75 ans

Dans le cadre de ses travaux, King (2017) a notamment mis en évidence que certains paramètres du cours d'eau amont (la largeur plein-bord, longueur du tronçon principal), l'aire drainée ou encore le volume du ponceau constituent des prédicteurs pertinents pour évaluer le risque de défaillance des ponceaux sur les cours d'ordres restreints.

Les ponceaux sont par ailleurs particulièrement exposés à l'accumulation d'embâcles et de sédiments. En obstruant partiellement l'entrée amont ou l'intérieur de l'ouvrage, les embâcles et les sédiments provoquent une perte de capacité hydraulique par rapport au débit de conception qui peut s'avérer préjudiciable (Goodridge et al. 2011, Shall et al. 2012). Leur accumulation

nécessite à minima un entretien régulier et éventuellement la mise en place de structures de contrôle spécifiques comme dispositifs pare-embâcles.

Le surdimensionnement des ponceaux reste néanmoins la conception la plus adaptée au transit des débris végétaux.

2.2 Réparations et remplacement d'ouvrages

Quatre types d'interventions sont associées à la gestion des ouvrages défaillants : la maintenance, la réparation, le remplacement ou encore la conduite d'investigations complémentaires (Schall et al. 2012).

Contrairement aux opérations de maintenance et d'investigations complémentaires, le choix d'une réparation ou d'un remplacement d'ouvrage nécessite une analyse coûts-bénéfice prenant notamment en compte l'ampleur et la nature des désordres, les contraintes associées à l'opération, les bénéfices annexes aux travaux et le coût de l'opération. La décision peut également s'appuyer sur un arbre de décision logique tel que celui proposé par le *Federal Lands Highway* (Hunt et al. 2010).

2.2.1 Réparation d'ouvrages

L'objet de cette section n'est pas de faire un descriptif exhaustif et détaillé des techniques de réparation associées aux ponceaux. Ces détails peuvent notamment être retrouvés dans l'ouvrage *Hydraulic Design of Highway Culvert* (Schall et al. 2012). Un certain nombre de considérations relatives à l'impact des réparations sur l'hydraulicité de l'ouvrage et le franchissement piscicole sont toutefois nécessaires.

2.2.1.1 Réparations manuelles de défaillances mineures

Lorsque les défaillances sont mineures, celles-ci peuvent généralement faire l'objet d'une réparation manuelle, limitant ainsi les coûts et les impacts sur les caractéristiques initiales des ponceaux (Schall et al. 2012). Ces opérations comprennent notamment le rejointoiement et les reprises locales, uniquement envisageables si les dimensions de l'ouvrage le permettent.

2.2.1.2 Par insertion

Pour les défaillances étendues ou les ouvrages inaccessibles, la réparation de l'ouvrage par gainage constitue une alternative souvent considérée plus avantageuse que le remplacement

de celui-ci (Schall et al. 2012, Pêche et Océans Canada 2016). Ces pratiques consistent à insérer dans l'intégralité de l'ouvrage existant un nouveau ponceau ou un revêtement adapté (PVC, mortier, époxy). Compte tenu de l'exposition particulière du fond de l'ouvrage aux détériorations, la mise en place d'un revêtement partiel en béton ou métallique peut également s'avérer avantageuse. Notons que l'emploi d'un revêtement permet d'assurer l'étanchéité d'un ponceau, mais n'est pas adapté aux ouvrages présentant une défaillance structurelle (Schall et al. 2012). La réparation par gainage entraîne toutefois une modification des propriétés générale de l'ouvrage :

- **Une modification des caractéristiques hydrauliques**, provoquée à la fois par une réduction de la section en travers de l'ouvrage et une modification de la rugosité de celui-ci. L'interaction de ces deux phénomènes peut toutefois contrebalancer l'impact sur la capacité hydraulique (Schall et al. 2012). L'importance de la diminution de section en travers est par ailleurs exacerbée dans les ouvrages de faibles dimensions.
- **Une modification des conditions de franchissement**. Lors de la réparation d'un ouvrage, il convient de s'assurer que les modifications hydrauliques associées n'entraînent pas d'impact sur le franchissement piscicole. Le principal facteur limitant le franchissement dans ce contexte est l'accroissement des vitesses d'écoulement lié à une diminution de la rugosité équivalente de l'ouvrage (Goerig et al. 2016). Dans une moindre mesure, la réduction de section en travers peut limiter les conditions d'envolement de l'ouvrage ou favoriser la formation d'une petite chute aval.

2.2.2 Remplacement d'ouvrages

Le remplacement d'un ouvrage s'apparente sensiblement à une nouvelle installation. La principale différence réside toutefois dans la nécessité d'excaver et retirer l'ouvrage initial. La prise en compte des surcoûts liés aux opérations de terrassement et de transport est donc nécessaire. Le remplacement d'un ouvrage est également susceptible d'impacter plus durablement la circulation et les usages associés par rapport aux réparations. L'ensemble de ces facteurs entraîne une considération du remplacement principalement en dernier recours ou dans le cas de désordres particulièrement importants.

Il convient toutefois de noter que l'analyse coût-bénéfice du remplacement d'un ouvrage **ne doit pas intégrer uniquement le coût initial**, mais également l'amélioration de la durée de vie du nouvel ouvrage, l'amélioration des conditions de franchissement piscicole ou encore la

réduction des mesures d'entretien de l'ouvrage. Cette analyse à l'échelle de la durée de vie est notamment détaillée dans le chapitre 3.4.

Lors du remplacement d'un ouvrage, il est également nécessaire de considérer l'éventuelle évolution morphologique du cours d'eau favorisée par l'ouvrage précédent. Celui-ci peut en effet constituer un point de fixation du profil en long lorsque le cours d'eau est impacté par une incision de son lit. Lorsque cette situation est rencontrée, il peut être nécessaire d'augmenter la pente de l'ouvrage par rapport aux critères de conception préconisés afin de prévenir une propagation du phénomène par érosion régressive du lit (Kilgore et al. 2010). La conception du ponceau doit alors être adaptée afin d'assurer à la stabilité de l'ouvrage, du substrat et le succès du franchissement piscicole.

2.3 Impacts sur les milieux aquatiques relatifs à l'installation de ponceaux

Par de nombreux aspects, l'installation ou le remplacement d'un ponceau peut impacter les milieux aquatiques si elle est réalisée sans précautions. Au Canada, la **loi sur les pêches** (L.R.C. 1985, ch. F-14) et la **loi sur les espèces en péril** (L.C. 2002, ch. 29) constituent le cadre législatif fédéral encadrant l'installation des ponceaux afin d'éviter, atténuer et réduire les impacts potentiels sur les espèces et leurs habitats (Gouvernement du Québec 1997).

La réalisation d'une intervention en cours d'eau est soumise à autorisation afin de notamment limiter les impacts temporaires ou permanents, au droit de l'ouvrage et dans les milieux environnants.

Les éléments cités ci-dessous regroupent les principales thématiques concernées par la réalisation de travaux sans pour autant constituer une liste exhaustive.

2.3.1 Impacts à court terme

2.3.1.1 Périodes d'intervention en milieux aquatiques

La réalisation de travaux en cours d'eau doit être planifiée en dehors des périodes dites sensibles pour les espèces piscicoles (Pêche et Océans 2016). Ces périodes sensibles incluent la fraie, l'incubation des œufs, l'alevinage ou encore la migration. Sur le territoire Canadien, les périodes d'intervention à privilégier sont présentées par provinces sur le site du gouvernement canadien (en ligne : <https://www.dfo-mpo.gc.ca/pnw-ppe/timing-periodes/index-fra.html>).

Notons par ailleurs qu'une planification et une conception efficace des aménagements permettent de réduire la durée et donc le préjudice porté aux milieux aquatiques (Pêche et Océans 2016).

2.3.1.2 Perturbation ou rupture des écoulements

La réalisation de travaux en milieux aquatiques implique nécessairement une gestion des écoulements et notamment la mise hors d'eau partielle ou totale du site afin de faciliter leur exécution et limiter l'apport de sédiments. Un dénoiement local sur site est bien souvent indispensable et doit s'accompagner de mesures préalables telles que la réalisation d'une pêche de sauvetage afin de réduire au minimum les impacts sur la faune piscicole (Pêche et Océan 2016). Un impact sur le reste de la faune aquatique comme les invertébrés aquatiques reste néanmoins inévitable avec toutefois un potentiel de résilience rapide à l'issue des travaux (Barton 1977).

Il est toutefois indispensable de garantir la continuité des écoulements ainsi qu'un débit suffisant au maintien du fonctionnement des écosystèmes aquatiques et attenants situés en amont et en aval de l'ouvrage (Pêche et Océans 2016).

2.3.1.3 Les sédiments

Les sources d'apports en sédiments sont nombreuses lors de la construction d'un ouvrage et découlent notamment de la circulation de machineries dans le cours d'eau, des opérations de terrassement, ou de l'érosion des surfaces à nues par les précipitations telles que les remblais et les zones terrassées (Rothwell 1983, Lane et al. 2002, Bérubé et al. 2010, Pêche et Océans 2016). Le système racinaire étant une composante essentielle au maintien des berges, la dévégétalisation est donc susceptible de favoriser l'érosion et le sapement de celles-ci au droit du futur ouvrage. Notons également que la dévégétalisation des berges lors des travaux favorise le réchauffement du cours d'eau (Aust et al. 2011).

L'apport excessif de sédiments fins dans un cours altère la fonctionnalité de celui-ci sur l'ensemble des niveaux trophiques (Rinella & al. 2003). La turbidité occasionnée par la présence de matières en suspension (MES) limite la productivité primaire et perturbe les performances de chasse des poissons (Bruton 1985, Rinella & al. 2003). L'action érosive des particules en suspension impacte également la flore ainsi que les performances respiratoires des poissons (Bruton 1985, Rinella & al. 2003). Le colmatage du substrat réduit la quantité d'habitats disponible et les sources de nourriture des invertébrés et par conséquent des

poissons. Le colmatage des frayères limite également la capacité des poissons à creuser leurs nids (Zeh et al. 1994) et la circulation d'eau dans les sédiments responsable de la mort des œufs par asphyxie (Bruton 1985, Julien et al. 2006) ou perturbe l'émergence des alevins (Louhi et al. 2011).

L'emploi de mesures de protection contre la dispersion des sédiments doit être adapté aux contraintes du site. La mise en oeuvre de barrières à sédiments adaptées, la dérivation des eaux vers des zones de décantation ou encore l'éloignement au cours d'eau des zones de stockage des remblais constituent des mesures adaptables à la majorité des sites (MRN 2001, Pêche et Océan 2016). À l'issue des travaux, une revégétalisation du site permet d'accélérer le processus de recolonisation et ainsi protéger les talus contre l'érosion (Gouvernement du Québec 1997).

2.3.1.4 Pollution directe

La réalisation de travaux dans ou à proximité des cours d'eau présente un risque de pollution directe par déversement de contaminants tels que le carburant ou encore les huiles et graisses utilisées pour les machines. En se déversant accidentellement, ces produits peuvent entraîner une contamination du cours d'eau et de la nappe alluviale préjudiciable à la survie des organismes aquatiques.

Des précautions adaptées à ce type de risques doivent être mises en place en tenant compte des spécificités du site. Pour les machines utilisant des huiles nécessaires à la lubrification (pelles mécaniques notamment), l'usage d'huiles biodégradables est à privilégier. L'utilisation d'huile de chaîne biodégradable d'origine végétale pour les tronçonneuses est également préconisée. L'approvisionnement, l'entretien et la réparation des engins doivent également s'effectuer sur des aires spécialement aménagées à cet effet, à l'écart du cours d'eau et des fossés. Enfin tout écoulement de béton, ou déversement des eaux de lavage sur le chantier et les fossés attenants doit être proscrit. La présence de kit antipollution et de tapis absorbants disponible sur le chantier permet également une intervention rapide en cas d'accident.

2.3.1.5 Le franchissement et les habitats piscicoles

De manière générale l'aménagement d'un ponceau est particulièrement susceptible de perturber temporairement le franchissement piscicole, notamment au droit des ouvrages de dérivations. Si des précautions particulières sont nécessaires à cet égard, les by-pass,

batardeaux et autres infrastructures devront être conçus en adéquation avec le franchissement piscicole (Pêche et Océans 2016).

Les ouvrages temporaires présentent également un risque de dégradation de l'habitat piscicole. Afin de limiter autant que possible les impacts à ce niveau, le nombre d'ouvrages temporaires doit être réduit à son maximum (Pêche et Océan 2016). Une attention particulière devra également être portée à la remise en état du site lors du démantèlement de la zone de travaux.

Comme évoqué précédemment, les interventions en cours d'eau sont réalisées en dehors des périodes dites sensibles afin de limiter leur impact sur la faune piscicole et notamment le déroulement de leurs cycles biologiques.

2.3.2 Impacts à moyen et long termes

2.3.2.1 Sédimentation et incision

Comme évoqué précédemment, la principale source de sédiments fins aux abords des traversées de cours d'eau est liée à l'érosion des talus et remblais, souvent non végétalisés (Rothwell 1983, Bérubé et al. 2010). Cet apport semble prédominant durant l'année suivant la construction de l'ouvrage avant de diminuer progressivement sans atteindre les niveaux initiaux (Lachance et al. 2008)

En modifiant localement la morphologie des cours d'eau, notamment la pente et la largeur d'écoulement, la présence de ponceaux est également susceptible d'impacter les processus de transit sédimentaire et de favoriser la sédimentation ou l'incision du cours d'eau (Bates et al. 2003, Jackson 2003). Des zones de dépôt de sédiments sont régulièrement observées en amont de l'ouvrage tandis que l'incision est principalement observée à l'aval de celui-ci (Hernick et al. 2019) :

- L'alignement de l'ouvrage favorise le transit sédimentaire et limite le risque d'incision ou de sédimentation accrue.
- L'augmentation de pente ou encore la diminution de rugosité au passage de l'ouvrage entraînent une augmentation des vitesses d'écoulement dans celui-ci. L'énergie excédentaire acquise par l'écoulement peut se traduire en aval du ponceau par l'érosion du lit et des berges (Hernick et al. 2019). Ce phénomène est notamment à l'origine de la formation d'une fosse de dissipation et d'une chute en aval des ouvrages (Furniss et al. 2006).

- Au contraire, une diminution de la pente dans l'ouvrage favorise la déposition des sédiments.
- Un surdimensionnement non adapté du ponceau favorise un dépôt accru de sédiments dans l'ouvrage. Ce phénomène est notamment observé en l'absence d'un chenal d'étiage, lorsque l'étalement de la lame d'eau favorise une diminution de la capacité de transport de l'écoulement.

La position d'un ouvrage aux abords d'une rupture du profil en long peut également accroître les risques d'incision et de sédimentation (Pêche et Océans 2016). Cette exposition aux risques d'incision et de sédimentation est notamment mise en évidence par le ratio de pente (RP), définit la pente dans l'ouvrage divisé par celle du tronçon situé en amont. Les différentes configurations aux abords d'une rupture de pente et leurs conséquences sur les risques d'incision et de sédimentation sont présentées ci-dessous.

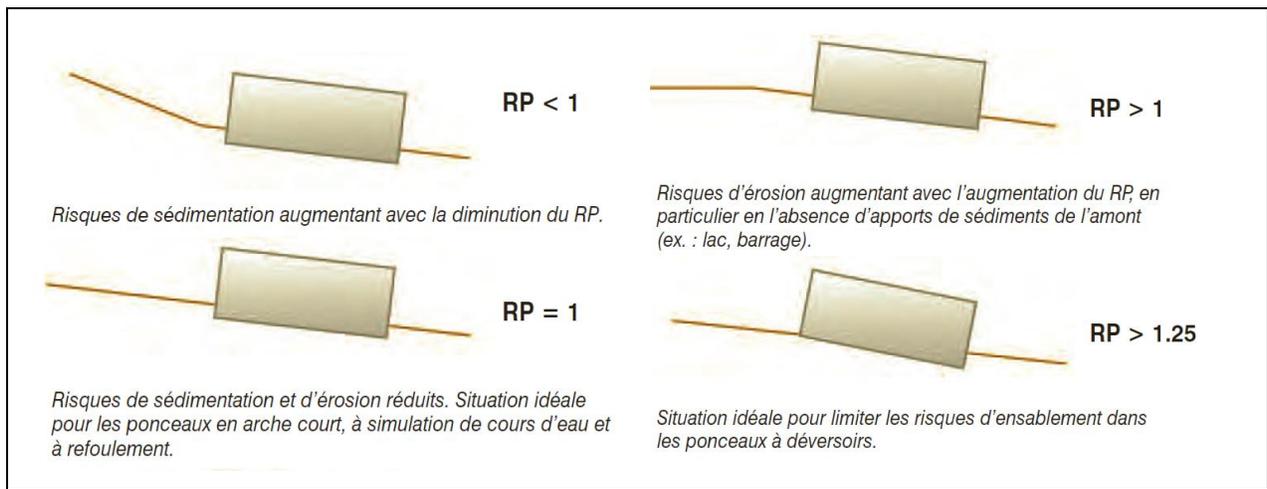


Figure 2.2 Positionnement d'un ponceau aux abords d'une rupture de pente – impacts sur le risque d'incision et de sédimentation (issu de Pêche et Océans 2016)

2.3.2.2 Température de l'eau

L'impact des traversées de cours d'eau sur le régime thermique des rivières a été faiblement documenté comparativement aux impacts sur la faune.

Sur les cours d'eau de petite taille, la présence de cours d'eau recouverts par les ponceaux est associée à l'apparition de pics de températures plus importants et réguliers lors des précipitations intenses (Lemay 2010). Les mécanismes physiques associés à ces observations ne sont toutefois pas clairement définis.

Comparativement aux autres traversées de cours d'eau tels que les passages à gué ou les ponts, les ponceaux entraînent une augmentation plus importante de la température de l'eau en aval des ouvrages (Aust et al. 2011). Cette augmentation de température en contexte d'exploitation forestière pourrait être expliquée en partie par la perte du couvert arboré, et donc d'ombrage, nécessaire à la présence de la route. L'emprise dévégétalisée requise est en effet plus importante lorsqu'il s'agit d'un ponceau.

2.3.2.3 Franchissement piscicole

En modifiant les conditions d'écoulement locales, les ponceaux conçus inadéquatement peuvent constituer une barrière pour certains stades de développement, certaines espèces et ce pour tout ou partie des conditions hydrologiques rencontrées. Cet impact sur le franchissement piscicole est provoqué par une inadéquation entre les conditions hydrauliques et les capacités de nage et de saut des poissons (Warren et al. 1998, Larinier 2002, Bouska et al. 2010). De l'aval vers l'amont, les poissons en montaison sont susceptibles d'être bloqués par la présence d'une chute en aval de l'ouvrage, par la présence de tirants d'eau insuffisants, par la présence de redans dans l'ouvrage, une turbulence ou encore des vitesses d'écoulement trop élevées (Bates et al. 2003, Hotchkiss et al. 2007, Baudoin et al. 2014, Goerig et al. 2016).

2.3.2.4 Autres communautés fauniques

Selon la conception de l'ouvrage, la présence d'un ponceau est également susceptible de perturber les communautés ou le mouvement d'autres espèces que les poissons, qu'elles soient aquatiques ou terrestres.

La modification des paramètres hydromorphologiques imputables à la présence de ponceaux influence également l'abondance de certains taxons d'invertébrés aquatiques (Khan et al. 2008). La diversité des taxons ne semble toutefois pas varier significativement par rapport aux portions de cours d'eau sans ouvrages.

Les bordures de cours d'eau sont régulièrement exploitées par la faune terrestre pour se déplacer. En ce sens, la présence de ponceaux de petite taille peut empêcher le franchissement direct de l'ouvrage et nécessiter un passage par la route avec un risque de mortalité plus élevé. La prise en compte de la faune terrestre via la mise en place d'une bande exondée dans l'ouvrage peut limiter l'impact, notamment lorsqu'il s'agit d'une route fréquentée avec peu de points de passage pour la faune (Dole et al. 2004, Craveiro et al. 2019)

2.3.2.5 Berges, ripisylve et milieux attenants

Comme évoqué précédemment, la dissipation d'énergie au pied des ouvrages possède un grand potentiel érosif, notamment sur les berges. Selon la nature des matériaux constitutifs et la végétalisation, ces contraintes peuvent entraîner une érosion progressive voir le sapement des berges.

La présence de ponceaux est également susceptible d'impacter la présence et la répartition de milieux sensibles. La partie amont des ponceaux, de par son effet de constriction sur les écoulements, constitue une zone favorable à l'accumulation d'embâcles. Elle constitue également une zone régulièrement obstruée par les barrages de castors. L'augmentation du niveau d'eau engendré par la présence de débris à l'entrée de l'ouvrage peut favoriser un dysfonctionnement majeur des milieux sensibles tels que les tourbières, y compris lors d'évènements ponctuels (Bocking et al. 2017). La prise en compte de ces problématiques apparaît indispensable afin de limiter l'impact du ponceau sur les milieux alentour (Bocking et al. 2017, Saraswati et al. 2020).

2.3.2.6 Abandon d'ouvrages

Une pratique courante, notamment dans le cadre de l'industrie forestière, est d'abandonner l'entretien des voies d'accès lorsque la concession d'exploitation forestière arrive à son terme (Paradis-Lacombe 2018).

L'absence d'entretien et l'atteinte de la durée de vie limite de l'ouvrage entraînent un risque de défaillances élevé tel que l'obstruction par les embâcles ou la rupture des matériaux. À terme ces défaillances peuvent se traduire par une discontinuité des habitats et des écoulements, l'ennoiement des habitats amont ou encore l'arrachement de ponceaux entraînant une injection massive de sédiments et de matériaux dans le cours d'eau.

Bien que la déconstruction des voies d'accès et des traversées de cours d'eau soit également génératrice d'un départ de sédiments fins dans le cours d'eau (Foltz et al. 2007), leur retrait limite les quantités relarguées ainsi que les autres perturbations associées.

3 Ponceaux à simulation de cours d'eau

3.1 Le concept de simulation de cours d'eau

Différentes méthodes de conception des ponceaux ont vu le jour afin de permettre le franchissement d'un ouvrage par les organismes aquatiques. Celles-ci sont généralement classifiées en trois catégories : la conception hydraulique ichtyocompatible, la simulation hydraulique et la simulation de cours d'eau (Hotchkiss et al. 2007, Kozarek et al. 2015, Pêche et Océans Canada 2016, Hernick et al. 2019). Chaque méthode présente ses spécificités en termes d'espèces, de stades de développement ciblés, de contraintes d'installation et de coûts.

La conception hydraulique ichtyocompatible correspond à la création d'un dispositif de franchissement adapté aux capacités de nage et de saut d'une espèce ou d'un stade de développement précis. À la base de la réflexion dans la conception des passes à poissons, cette approche s'avère toutefois sélective et la continuité du transit sédimentaire n'est pas considérée dans ce type d'aménagement.

La simulation hydraulique vise à proposer dans l'ouvrage des conditions hydrauliques diversifiées et similaires à celles du cours d'eau, sans pour autant être identique. L'objectif est d'obtenir des hauteurs d'eau, des vitesses et une turbulence proches du milieu naturel et donc considérées comme adéquates pour le franchissement piscicole. Dans cette approche, le substrat utilisé est considéré fixe et peut donc sensiblement différer du substrat du cours d'eau (Hotchkiss et al. 2007). Le transit sédimentaire est par ailleurs préservé à minima pour les fractions les plus fines du substrat (Timm et al. 2017).

La simulation de cours d'eau repose sur une approche mimétique de la morphologie d'une portion de cours d'eau appelée «trouçon de référence» (Cenderelli et al 2011). En proposant dans l'ouvrage un lit similaire à celui du cours d'eau, les conditions de franchissement sont pressenties pour être sensiblement identiques au milieu naturel (Bates et al. 2003, Jackson 2003, Clarkin et al. 2005, Hotchkiss et al. 2007). L'un des principaux avantages de cette approche est d'envisager le franchissement piscicole de l'ouvrage pour l'intégralité des espèces et stades de développement, et cela tout au long de l'année (Gubernik et al. 2008, Cenderelli et al. 2011). Cette approche permet par ailleurs de préserver l'intégralité des processus morphologiques sédimentaires (Bates et al. 2003, Hotchkiss et al. 2007, Gubernik et al. 2008).

Les critères de dimensionnement employés pour la **simulation de cours d'eau** présentent des variantes selon la littérature consultée. La simulation de cours d'eau repose principalement sur

le mimétisme des quatre caractéristiques morphologiques principales du cours d'eau que sont la largeur du lit, la pente de l'ouvrage, le substrat utilisé et les formes du lit. Les travaux réalisés par Bates et al. (2003) et Gubernik et al. (2008) détaillent l'ensemble des étapes de dimensionnement et les critères retenus pour la conception des ponceaux à simulation de cours d'eau.

- La largeur du lit dans l'ouvrage est dimensionnée pour permettre la mise en place d'un lit de largeur plein bord équivalent à celui mesuré sur le tronçon de référence. La formation de berges au sein de l'ouvrage à l'aide de matériaux représentatifs des plus grosses particules du lit constitue également un prérequis à la rugosité générale des berges. Cette configuration favorise également la présence de zones de faibles vitesses pour le franchissement piscicole à proximité des parois. En fonction de la littérature consultée, la largeur minimum de l'ouvrage est comprise entre :

$$L_{\text{min lit ouvrage}} = L_{\text{plein bord}} + 4 \cdot D_{100} \text{ (Gubernik et al. 2008)}$$

$$L_{\text{min lit ouvrage}} = 1.2 \cdot L_{\text{plein bord}} + 0.6\text{m (Bates et al. 2003)}$$

- La pente de l'ouvrage est ajustée au plus près de la pente du lit, idéalement mesurée en amont de l'ouvrage. Barnard et al. (2003) et Gubernik et al. (2008) mentionnent un degré d'ajustement limite de la pente de 125% par rapport à celle du cours d'eau. Pour les cours d'eau incisés, cet ajustement permet de maintenir la cote altimétrique du lit en amont de l'ouvrage et ainsi éviter la propagation d'une érosion régressive, tout en minimisant la modification des caractéristiques hydromorphologiques à l'intérieur de l'ouvrage. L'augmentation de la pente est toutefois susceptible d'entraîner des répercussions directes sur la stabilité du substrat et donc nécessiter un ajustement de celui-ci.
- La granulométrie employée, qu'elle soit issue du site ou recréée, suit une courbe granulométrique similaire à celle du cours d'eau. Cette conception implique idéalement une mobilisation du substrat similaire dans l'ouvrage et le cours d'eau. Une attention particulière est portée à la prise en compte des grosses particules pour garantir la stabilité du lit et des particules fines qui limitent la présence d'écoulements interstitiels, notamment en période d'étiage (Kilgore et al. 2010, Pêche et Océans Canada 2016).
- Les formes du lit sont également similaires à celles observées sur le tronçon de référence, en adéquation avec la typologie du lit (Gubernik et al. 2008). Le dimensionnement inclut également la formation d'un chenal d'étiage afin favoriser la fonctionnalité de l'aménagement en conditions de bas débits jusqu'à ce que les crues morphogènes remodelent le lit (Hotchkiss et al. 2007).

Ouvrages à lit mobile

La littérature consultée fait apparaître une différence d'approche notable en ce qui concerne la granulométrie, et notamment sa stabilité dans l'ouvrage. Une partie des auteurs (Bates et al. 2003, Hotchkiss et al. 2007, Gubernik et al. 2008) considèrent que le substrat doit être identique dans l'ouvrage et dans le cours d'eau. Cette conception implique que les particules soient mobilisées à des périodes similaires dans l'ouvrage et le cours d'eau. Afin d'éviter le lessivage du substrat dans le ponceau, un équilibre entre la mobilisation dans l'ouvrage et le recrutement de particules provenant de l'amont est donc indispensable. Le maintien de substrat dans l'ouvrage constitue en effet un paramètre critique pour le franchissement piscicole et garantir la stabilité du ponceau (voir chapitre 3.2). Malgré une reproduction des caractéristiques morphologiques aussi fidèle que possible, le ponceau exerce un effet de constriction sur les écoulements pour des débits supérieurs au débit de plein bord (Bates et al. 2003). Ce constat est particulièrement observé pour les cours d'eau alluviaux où les écoulements dans la plaine d'inondation jouent un rôle majeur en période de crue (Bates et al. 2003, Kilgore et al. 2010). Selon la largeur des ouvrages, il peut s'en suivre une accélération notable des écoulements au passage du ponceau associé à une augmentation locale des contraintes de cisaillement. Des particules de taille identiques sont donc mobilisées à des débits plus faibles dans l'ouvrage, entraînant à terme une perte de substrat. Un effet similaire est également observé lorsque l'ouvrage est positionné à une pente approchant la valeur limite de 125% par rapport à la pente du cours d'eau (Bates et al. 2003, Hotchkiss et al. 2007).

Ouvrage à lit fixe

Afin de contrebalancer ce phénomène, plusieurs approches préconisent d'augmenter la taille du substrat afin de conserver un lit stable et fixe au sein du ponceau. L'ouvrage reste toutefois transparent au regard du transit sédimentaire puisque la circulation des particules est conservée entre l'amont et l'aval. Les aménagements à substrats fixes sont plébiscités pour leur conception et leur mise en œuvre plus aisée (Pêche et Océans Canada 2016). Dans cette approche, les ponceaux à simulation de cours d'eau ne constituent donc pas une procédure de restauration d'habitats au sens propre du terme, même si la présence de substrat naturel dans l'ouvrage permet une amélioration par rapport à un ponceau conventionnel (Timm et al. 2017).

Les ouvrages à lit fixe sont donc classifiés différemment selon la littérature. Les *Lignes directrices pour les traversées de cours d'eau au Québec* (Pêche et Océans Canada 2016) les considèrent comme une classe spécifique dans le dimensionnement des ponceaux à simulation de cours d'eau, également dénommés ponceaux à simulation de cours d'eau hybride. Pour

Bates et al. (2003) et Gubernik et al. (2008), la granulométrie dans l'ouvrage peut faire l'objet d'un ajustement (marge de 25%), mais la mise en place d'un substrat fixe, y compris en crue, est considérée comme une simulation hydraulique et non une simulation de cours d'eau.

3.2 Un concept, deux approches : ouvrages ouverts à fond libre ou fermés surdimensionnés

3.2.1 Ouvrages à fond libre

Les ouvrages à fond libre constituent les ponceaux les plus adaptés pour assurer le franchissement piscicole et le libre transit sédimentaire. Leur configuration à trois côtés, sans radier, permet en effet de minimiser les impacts sur les berges, la pente et le substrat du cours d'eau (Pêche et Océans Canada 2016). Notons toutefois qu'une largeur d'ouvrage restreinte entraîne généralement une destruction totale ou partielle du matelas sédimentaire et des formes morphologiques lors de la mise en œuvre (Bates et al. 2003, Hotchkiss et al. 2007). Le lit doit donc être reconstitué à l'issue du projet. La conception des ouvrages à fond libre permet également un ajustement du lit dans le ponceau aux variations verticales du cours d'eau. Un ajustement latéral est également possible lorsque la largeur de l'ouvrage est suffisante (Bates et al. 2006).

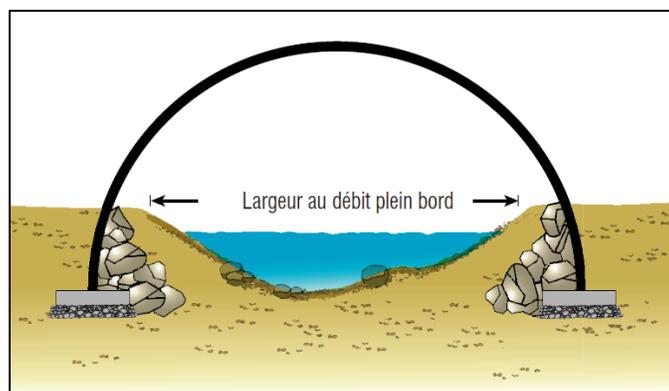


Figure 3.1 Coupe en travers type d'un ponceau à fond libre de conception simulation de cours d'eau (issu de Pêche et Océans 2016)

Le frein principal à l'installation généralisée de ponceaux à fond libre est lié à leur exposition aux risques d'affouillements (Kornel et al. 2003, Kornel et al. 2007, Crookston et al. 2012). Bien que toute la longueur de l'ouvrage soit exposée, le phénomène est particulièrement prédominant aux extrémités de celui-ci (Kornel et al. 2007, Crookston 2012). En fonction de l'orientation du courant et de la configuration de l'ouvrage, l'entrée hydraulique du ponceau favorise en effet une contraction des lignes d'écoulement. Il se forme alors à ce niveau une

zone de décollement entre les parois de l'ouvrage et les lignes d'écoulement principales. Cette zone d'écoulement secondaire est favorable à la formation de vortex et autres tourbillons responsables d'une érosion accrue du substrat. En l'absence de contrôle de la ligne d'eau en aval, les vitesses les plus importantes sont observées à l'exutoire de l'ouvrage et la capacité d'érosion est également importante à ce niveau (Kornel et al. 2007, Crookston et al. 2012).

De manière générale la tenue d'**investigations géotechniques** constitue un préalable nécessaire afin de définir la nature des sols et donc la faisabilité du projet (Hernick et al. 2019). Le niveau de détail des investigations sera ajusté à la connaissance du site et aux observations réalisées sur l'instabilité du lit et de la pente, le risque d'incision, le blocage sédimentaire existant, etc. La caractérisation préalable du sous-sol est en effet nécessaire pour définir la nature des fondations dont il existe deux types :

- Des fondations constituées de semelles en plaque d'acier ou de béton directement ancrées dans le till ou de roche mère (Kornel et al. 2007, ministère de l'Environnement du Nouveau-Brunswick 2012, Pêche et Océans Canada 2016).
- Le surdimensionnement des fondations à une profondeur au moins égale à la cote altimétrique du talweg (Pêche et Océans Canada 2016). La prise en compte des risques d'érosion régressive peut néanmoins entraîner un enfouissement plus important et générer des surcoûts (Kornel et al. 2003).

Les travaux en laboratoire de Kornel et al. (2007) ont par ailleurs mis en évidence l'efficacité des murs en ailes pour réduire la profondeur des affouillements en partie amont de l'ouvrage, comparativement aux ouvrages non équipés. Leur présence, associée à un angle de 45° dans le cadre de l'étude, permet en effet de guider progressivement les écoulements et donc la turbulence générée au passage de l'ouvrage. Un constat similaire est effectué en aval de l'ouvrage avec une réduction significative de la profondeur d'affouillement obtenue avec un angle de 8°.

Le surdimensionnement du substrat, adapté aux conditions de crue, constitue une recommandation formulée dans plusieurs études pour éviter la formation d'affouillements. Au minimum, les matériaux utilisés pour recréer les berges au sein du ponceau seront dimensionnés pour être stables dans ces conditions hydrauliques (Gubernik et al. 2008).

3.2.2 Ponceaux à contours fermés surdimensionnés

Face aux contraintes d'aménagement et aux surcoûts engendrés par la conception de fondations anti-affouillement, la mise en place de ponceaux à contours fermés surdimensionnés est généralement favorisée par les concepteurs.

Le principe de dimensionnement des ponceaux à contours fermés surdimensionnés est le même que pour les ouvrages à fond libre. Les caractéristiques et les formes morphologiques du cours d'eau sont reproduites au sein de l'ouvrage. Comme évoqué précédemment, le surdimensionnement latéral permet de recréer dans l'ouvrage des berges et un gabarit équivalent à la largeur de plein bord. Pour ce type d'ouvrage, le fond du ponceau est volontairement enterré sous le talweg du cours d'eau (Kilgore et al. 2010, Kozarek et al 2015, Pêche et Océans Canada 2016) de façon à :

1. Maintenir une continuité entre le lit du cours d'eau et le lit dans l'ouvrage et donc favoriser le franchissement piscicole et le transit sédimentaire.
2. Assurer une rugosité dans l'ouvrage favorable au franchissement piscicole et au recrutement de particules du cours d'eau pour l'équilibre sédimentaire.
3. Garantir une épaisseur de substrat suffisante permettant la mise en place des processus morphodynamiques tels que la formation d'un pavement de surface.
4. Conserver la possibilité d'un ajustement vertical de faible ampleur du lit.

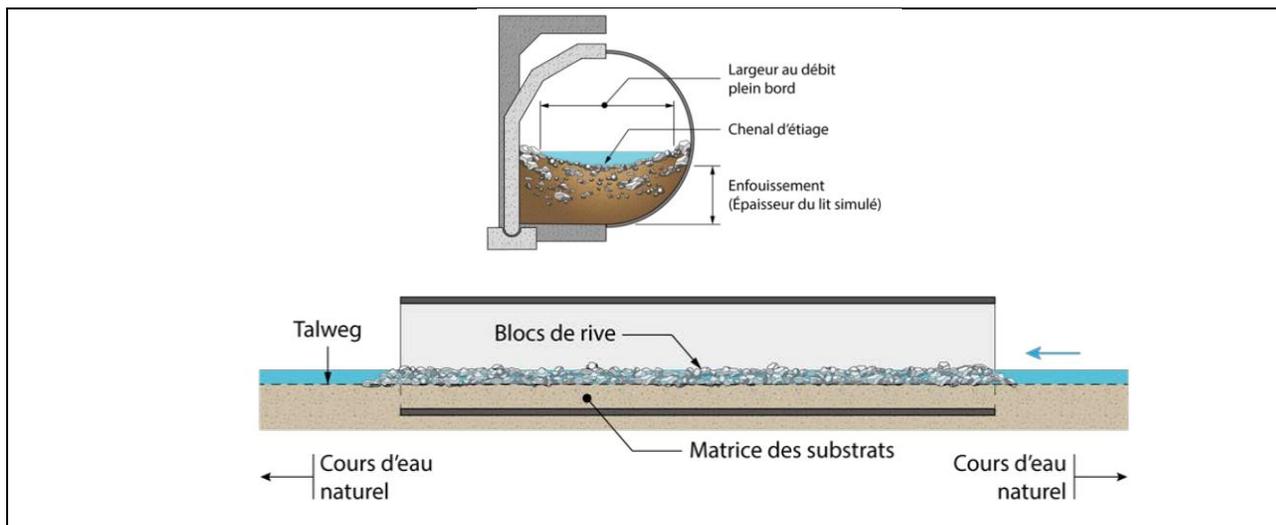


Figure 3.2 Coupe en travers (haut) et profil en long (bas) d'un ponceau surdimensionné de conception simulation de cours d'eau (issu de Ministère des transports du Québec 2019)

L'épaisseur recommandée de matelas sédimentaire dans l'ouvrage varie en fonction de la forme de l'ouvrage, mais également selon la littérature consultée. Le taux d'enterrement doit à la fois permettre la présence d'une épaisseur suffisante (voir critères ci-dessus) tout en

permettant de conserver une capacité hydraulique suffisante dans l'ouvrage en cas de dépôts. L'épaisseur plus importante de matelas sédimentaire requise dans les ponceaux circulaires et elliptiques est nécessaire pour en assurer la stabilité compte tenu du rétrécissement de l'épaisseur aux abords des parois latérales.

Tableau 3.1 Épaisseur du matelas sédimentaire recommandé dans les ponceaux à simulation de cours d'eau en contour fermé

Auteurs	Épaisseur conseillée dans les ouvrages circulaires et elliptiques	Épaisseur conseillée dans les ouvrages rectangulaires et en arches
Bates et al. (2003)	Entre 30 et 50 % de la hauteur de l'ouvrage	
Kilgore et al. (2010)	Sélectionner la valeur maximale entre : <ul style="list-style-type: none"> • 30% de la hauteur de l'ouvrage • 1 fois le D_{95} • 0.61 m 	Sélectionner la valeur maximale entre : <ul style="list-style-type: none"> • 20% de la hauteur de l'ouvrage • 1 fois le D_{95} • 0.61 m
Pêche et Océans Canada (2016)	Sélectionner la valeur maximale entre : <ul style="list-style-type: none"> • 30% de la hauteur de l'ouvrage • 1.5 fois le D_{100}, jamais inférieure à 1 fois le D_{100} 	Sélectionner la valeur maximale entre : <ul style="list-style-type: none"> • 20% de la hauteur de l'ouvrage • 1.5 fois le D_{100}, jamais inférieure à 1 fois le D_{100}

Dans ces ouvrages, la stabilité du substrat initialement en place ou le recrutement de substrat est absolument indispensable à la fonctionnalité de l'aménagement. En ce sens, le dimensionnement d'une **sous-couche stable** est souvent préconisé afin d'assurer une rugosité permanente dans l'ouvrage. Celle-ci est recouverte d'une couche de matériaux respectant la distribution granulométrique du cours d'eau naturel et donc mobilisable en période de crue. La couche supérieure mobilisable permet de conserver une capacité d'ajustement verticale dans l'ouvrage, bien qu'inférieure à un ponceau sans sous-couche stable. Le lessivage total de la couche de surface mobilisable correspond à la situation la plus défavorable.

Tout en respectant les recommandations concernant l'épaisseur de substrat totale (Tableau 3.1), Bates et al. (2003) et Gubernik et al. (2008) préconisent une épaisseur de sous-couche stable et de couche mobilisable équivalente à :

- **Épaisseur minimale de la couche de surface mobilisable** : maximum entre 1 fois le D_{95} et 0.30 m.
- **Épaisseur minimale de la sous-couche stable** : 1 fois le D_{95} dans les ouvrages rectangulaires et en arches. 1.5 fois le D_{95} dans les ouvrages circulaires et elliptiques.

Les modélisations en laboratoire réalisées par Kozarek et al. (2015) sur l'influence de la présence de substrat dans les ouvrages surdimensionnés et leur interaction sur les processus morphologiques associés corroborent ces recommandations. Les expérimentations ont démontré l'importance d'un dépôt initial de substrat lors de l'installation de l'ouvrage :

- Pour les cours d'eau de faible pente et pente intermédiaire, la mise en place de substrat lors de l'installation de l'ouvrage participe directement au maintien de matériaux dans l'ouvrage lors des débits de plein bord et de crue. En effet lorsque le débit est équivalent à la capacité de plein bord, l'ouvrage commence à exercer un effet de constriction sur les écoulements, le cours d'eau naturel ayant quant à lui la capacité de déborder.
- Le remplissage préliminaire du ponceau est généralement associé à une diminution des risques d'incisions en amont et en aval de l'ouvrage.
- Le remplissage naturel du ponceau est envisageable dans certaines configurations, mais ce scénario implique une analyse fine des processus de mobilisation sédimentaire dans le cours d'eau afin de déterminer si le remplissage peut s'effectuer sur une période raisonnable.
- Dans le cas des cours d'eau à forte pente, le remplissage seul de l'ouvrage n'apparaît pas suffisant pour garantir le maintien et la stabilité du substrat dans l'ouvrage. Lors de l'installation, la mise en place de structures morphologiques (seuils, radiers, mouilles, blocs) s'est montrée indispensable pour garantir la pérennité de l'aménagement.

Enfin l'emploi d'ouvrages en TTOG ou PEHD ondulé peut favoriser la rétention du substrat. La conception spécifique de structures de rétention au sein de l'ouvrage peut constituer une alternative afin d'assurer la stabilité du substrat et des formes morphologiques telles que les seuils (Gubernik et al. 2008, Contech Engineered solutions).

3.3 Considérations communes aux deux types d'ouvrages quant à la stabilité du matelas sédimentaire

La création d'un nouveau lit dans l'ouvrage est nécessaire pour les ponceaux fermés surdimensionnés et les ponceaux à fond libre dont le substrat aurait été détruit lors de la mise en œuvre. Pour ce faire, le nouveau lit est réalisé à l'aide des matériaux extraits pour l'installation du ponceau ou issus d'un mélange à partir de matériaux importés sur site. Quelle que soit l'origine du substrat, une considération particulière doit être apportée à la proportion de particules de petite taille. Leur présence, associée aux étapes de compactage, est en effet indispensable afin de garantir l'absence d'écoulements interstitiels notamment en conditions

d'étiages (Bates et al. 2003, Pêche et Océans Canada 2016). Dans le cas contraire, l'infiltration d'une partie de l'écoulement dans le substrat a pour conséquence de diminuer la profondeur d'eau dans le ponceau. Celle-ci peut alors s'avérer insuffisante pour permettre le franchissement piscicole.

Par ailleurs et comme évoquée précédemment, la déstabilisation du substrat intervient principalement en condition de débit supérieur au débit de plein bord. Une solution alternative à l'augmentation de la taille du substrat dans l'ouvrage consiste en la **mise en place de ponceaux de débordement dans la plaine d'inondation**. En favorisant les écoulements dans la plaine d'inondation, le débit de crue et donc les contraintes de cisaillement sur le lit ponceau sont diminués. Les particules de tailles identiques sont mobilisées de façon concomitante, favorisant ainsi le recrutement de particules dans l'ouvrage et donc la pérennité du lit (Bates et al. 2003, Gubernik et al. 2008, Pêche et Océans Canada 2016). Cette option n'apparaît toutefois envisageable que lors de la création d'un nouvel aménagement et la multiplication des ponceaux aura une incidence directe sur le coût global du projet.

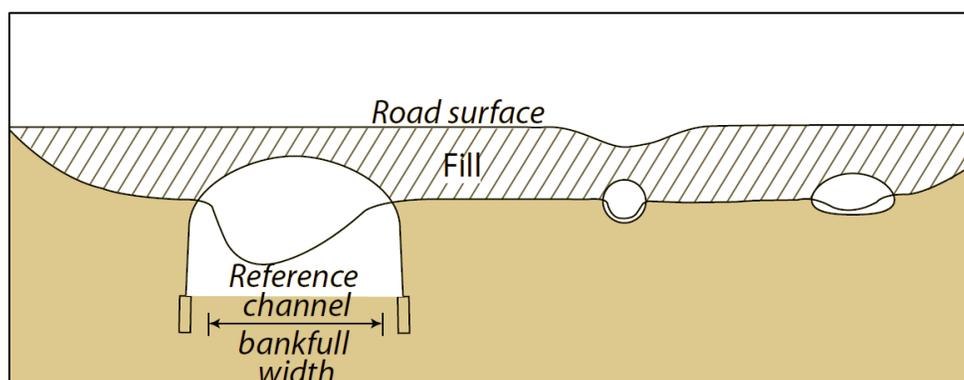


Figure 3.3 Ponceau à simulation de cours d'eau et ponceaux de débordement dans la plaine d'inondation (issu de Gubernick et al. 2008)

3.4 Considérations coûts – bénéfiques

Malgré l'intérêt écologique des ponceaux à simulation de cours d'eau et la multitude de guides explicitant leur dimensionnement, **l'efficacité de ce type d'aménagement sur le franchissement piscicole et le transit sédimentaire ont été relativement peu étudiés.**

Barnard et al. (2015) ont comparé 50 réalisations de ponceaux à simulations de cours d'eau de différents types et dimensionnements, avec leur tronçon de références. Les résultats indiquent que la majorité des ouvrages reproduisent globalement les caractéristiques morphologiques des tronçons de référence avec toutefois une certaine variabilité statistique. La simulation apparaît

néanmoins fidèle au regard des valeurs de D_{50} , D_{84} , largeur du lit pour une crue biennale et de vitesse d'écoulement moyenne pour une crue centennale. Les auteurs ont par ailleurs identifié une absence de corrélation entre les variables hydromorphologiques étudiées et l'âge de la structure ou les événements hydrologiques passés. La stabilité du profil en long dans les ponceaux renforce l'importance de la mise en œuvre initiale des matériaux lors de l'installation de celui-ci dans la mesure où les événements hydrologiques ne paraissent pas suffisants pour en assurer une réelle adaptation morphologique.

Timm et al. (2017) ont comparé l'efficacité du franchissement piscicole et du transit sédimentaire entre des ponceaux à simulation de cours d'eau et des ponceaux à refoulement. Du point de vue piscicole, l'étude des biomasses suggère que les ponceaux à simulation de cours d'eau sont plus efficaces pour permettre la dispersion des poissons en amont même si les ponceaux à refoulement restent fonctionnels. Un trisédimentaire est par ailleurs constaté entre l'amont et l'aval de l'ouvrage et cela pour les deux conceptions. Cette information suggère la durée importante nécessaire à l'équilibrage sédimentaire, suite au remplacement d'un ouvrage.

Le coût élevé de mise en œuvre des ponceaux à simulation de cours d'eau est généralement avancé comme argument contre leur préconisation généralisée, et ce en dépit de leur potentiel de restauration écologique (O'Shaughnessy et al. 2016).

Le surcoût des ponceaux à simulation de cours d'eau provient directement des facteurs suivants :

- Le coût d'un ponceau est directement lié à sa taille. Le surdimensionnement de la taille de l'ouvrage implique donc une augmentation du coût du projet par rapport aux ponceaux hydrauliques.
- Dans le cas des ponceaux à fond libre le surdimensionnement des fondations ou la mise en place de fondations anti-affouillements impacte directement le coût du projet.
- Dans le cas des ponceaux à contours fermés, l'enterrement de l'ouvrage implique des volumes de terrassement supérieurs par rapport aux ponceaux hydrauliques.
- La mise en œuvre du substrat et de la morphologie de l'ouvrage nécessite un travail soigné et rigoureux.

Dans leur analyse de remplacement de 15 ponceaux au Minnesota, *Hansen et al.* (2009) ont déterminé que le coût d'un ouvrage surdimensionné pouvait représenter à lui seul une majoration de 33 % par rapport à un ponceau rectangulaire conventionnel. En prenant en

compte la mise en œuvre des matériaux au sein de l'ouvrage, le surcoût associé atteint 50 à 70 %. Cette analyse porte toutefois uniquement sur le **coût initial, lié à l'achat et l'installation de l'ouvrage**, sans prendre en compte les bénéfices associés au surdimensionnement.

En effet les ponceaux à simulation de cours d'eau présentent une meilleure stabilité à long terme, ainsi qu'une plus faible exposition à l'accumulation d'embâcles (Gillespie et al. 2014). Ces facteurs contribuent notamment à un allongement de la durée de vie de l'ouvrage 50 à 75 ans soit entre un tiers à deux fois plus qu'un ouvrage conventionnel (Gillespie et al. 2014).

En favorisant la durabilité de l'ouvrage et en limitant leur entretien, les ponceaux à simulation de cours d'eau sont en mesure de présenter un coût total, à l'échelle de la durée de vie de l'ouvrage, inférieur aux ponceaux hydrauliques (Gillespie et al. 2014, Christiansen et al. 2014, O'Shaughnessy et al. 2016). Dans leur analyse, O'Shaughnessy et al. (2016) ont notamment mis en évidence leurs rentabilités sur les petits cours d'eau (< 1.5 m) où près de 80 % des ponceaux à fonds libres étudiés s'avèrent plus économiques à long terme qu'un ouvrage conventionnel. Le constat est néanmoins plus mitigé pour les cours d'eau de plus grande taille où le surdimensionnement latéral joue un rôle majeur.

Tableau 3.2 Analyse multicritères des différents types de ponceaux à simulation de cours d'eau

	Ponceau à fond libre	Ponceau à contour fermé surdimensionné	
		Ponceau circulaire et elliptique	Ponceau rectangulaire et arche
Franchissement piscicole et Transit sédimentaire	Pas de différence avérée entre les deux types d'ouvrages		
Adaptation morphologique	<p>(+) Ajustement vertical du lit plus important que pour les ouvrages à contours fermés</p> <p>(-) Ajustement latéral envisageable si la largeur de l'ouvrage est largement surdimensionnée</p>	<p>(+) Capacité d'ajustement vertical du lit supérieure à celle des ponceaux à contours fermés rectangulaires ou en arches, pour une largeur et une élévation du lit identique</p>	
		<p>(-) Ajustement latéral envisageable si la largeur de l'ouvrage est largement surdimensionnée</p>	
Problématiques	Risques d'affouillements	Risques de lessivage du substrat	
Considérations relatives aux habitats	<p>(+) Minimisent les répercussions sur le chenal lorsque la largeur de l'ouvrage est suffisante</p>	<p>(-) Destruction du substrat et des habitats du cours d'eau au droit de l'ouvrage</p>	
Mise en œuvre	<p>(+) Installation et stabilisation de l'ouvrage facilitées par rapport aux ponceaux à contours fermés</p> <p>(-) Propriété du sous-sol ou considération particulière des fondations</p> <p>(-) Durée d'installation et perturbations associées plus longues par rapport à l'installation des ponceaux à contours fermés</p>	<p>(+) Assemblage facilité par rapport aux ponceaux à contours fermés rectangulaires ou en arches</p> <p>(+) Hauteur de remblais sur l'ouvrage plus restreint</p>	

	Ponceau à fond libre	Ponceau à contour fermé surdimensionné	
Coût		Ponceau circulaire et elliptique	Ponceau rectangulaire et arche
Entretien	Entretien très réduit si l'installation est correctement réalisée : Pérennité de l'ouvrage Peu d'accumulation d'embâcles Adaptation aux variations morphologiques de l'ouvrage	Entretien réduit si l'installation est correctement réalisée : Pérennité de l'ouvrage Peu d'accumulation d'embâcles Adaptation plus faible aux variations morphologiques de l'ouvrage	

4 Autres techniques d'aménagement

4.1 Ponceaux à refoulement

L'objectif de ce dispositif est de proposer des vitesses et des tirants d'eau dans le ponceau compatibles avec le franchissement piscicole (Pêche et Océan 2016). Le refoulement de l'eau dans l'intégralité de celui-ci est rendu possible par le contrôle de la ligne d'eau en aval de celui-ci permettant l'atteinte d'un ratio $\frac{\text{Niveau d'eau amont}}{\text{Profondeur dans l'ouvrage}} < 1$ (Timm et al. 2017). L'ennoiement contrôlé par l'aval permet ainsi d'augmenter la surface d'écoulement pour un débit donné (Bates et al. 2003, Abbs et al. 2007, Hansen et al. 2009). Il en découle un accroissement significatif des aires d'écoulement inférieures à la vitesse moyenne, un accroissement des hauteurs d'eau et une réduction de la turbulence dans le ponceau par rapport à une situation d'écoulement uniforme.

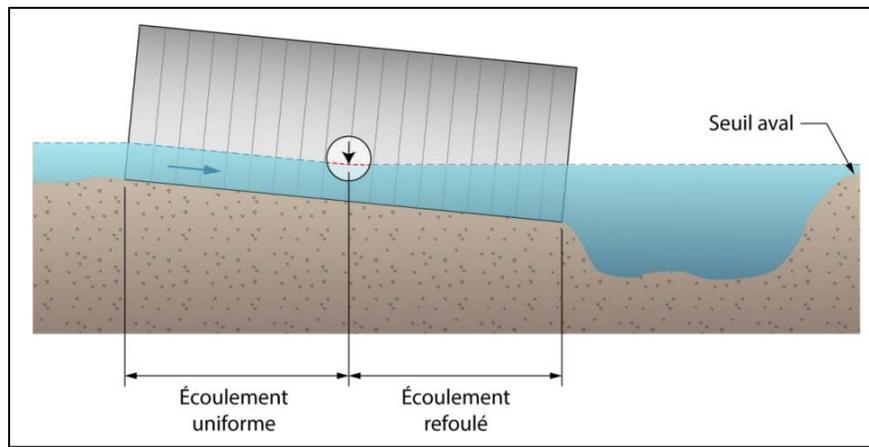


Figure 4.1 Profil en long d'un ponceau à refoulement non conforme (issus de Ministère des Transports 2019)

Le contrôle de la ligne d'eau aval est assuré par le seuil en aval de l'ouvrage, structure morphologique essentielle dans la conception des ponceaux à refoulement et dont la stabilité est indispensable à la pérennité de l'aménagement. Ce seuil permet par ailleurs de contrôler la stabilité du chenal vis-à-vis des risques d'incision (Parola 2008). Bien que l'utilisation d'un seuil naturel existant ou du talweg puisse être envisageable pour assurer l'élévation de la ligne d'eau (Pêche et Océan 2016), la conception d'un seuil stable et franchissable y compris en période d'étiage est souvent recommandée (California Fish and Game 2007, Parola 2008, Pêche et Océan 2016).

Une fosse de dissipation de l'énergie est par ailleurs prévue entre l'exutoire du ponceau et le seuil aval. Cette zone de transition est indispensable pour assurer la stabilité du chenal aval et notamment le seuil de contrôle en dissipant l'énergie excédentaire (Larinier 2002). Une attention particulière doit être portée à la stabilité des berges dans la mesure où le passage d'une section contrainte dans le ponceau à une section libre en aval peut générer des contraintes érosives importantes (Parola 2008).

La conception des ponceaux à refoulement est toutefois faiblement documentée. On notera toutefois que plusieurs conceptions peuvent être adoptées :

- Une conception seuil - mouille – seuil, qui s'apparente à une forme de simulation de cours d'eau. Uniquement adaptable aux nouvelles installations et remplacements d'ouvrage, cette conception prévoit d'associer le refoulement à un surdimensionnement de l'ouvrage (Parola 2008, Pêche et Océans 2016). Le refoulement étant conçu au même moment que l'ouvrage, la capacité hydraulique de celui-ci est adaptée en conséquence.
- Une conception hydraulique, dans laquelle le ponceau présente une taille et une disposition qui n'ont pas été dictées par le franchissement piscicole. Cette approche est généralement envisagée pour envoyer a posteriori des ouvrages existants. Il s'agit dans ce cas d'une conception hydraulique. L'adéquation entre les vitesses dans l'ouvrage après aménagement et les capacités de nage des espèces présentes doivent être analysées. Contrairement à la configuration précédente, le refoulement dans l'ouvrage entraîne une diminution de la capacité hydraulique de l'ouvrage par rapport au débit de conception. Il convient donc de s'assurer que le ponceau après aménagement disposera d'une capacité hydraulique suffisante.

Quelle que soit la conception de l'ouvrage, l'emploi de ponceaux en TTOG est préconisé compte tenu de la rugosité du matériau et donc des aires de faibles vitesses qu'il génère (Pêche et Océans 2016).

Tout comme les ponceaux à simulation de cours d'eau dont le substrat aurait été lessivé, les ponceaux à refoulement sont exposés aux risques d'érosion régressive si la stabilité du lit en amont n'est pas suffisante (Parola 2008, Pêche et Océan 2016). L'emploi d'une cloison de rétention érigée à l'entrée hydraulique de l'ouvrage peut être nécessaire de contrôler l'élévation du lit et donc bloquer tout risque d'érosion (Parola 2008). Afin de garantir la franchissabilité de l'ouvrage y compris en période d'étiage, le refoulement d'eau doit être conçu de sorte à maintenir un tirant d'eau suffisant au-dessus de la cloison.

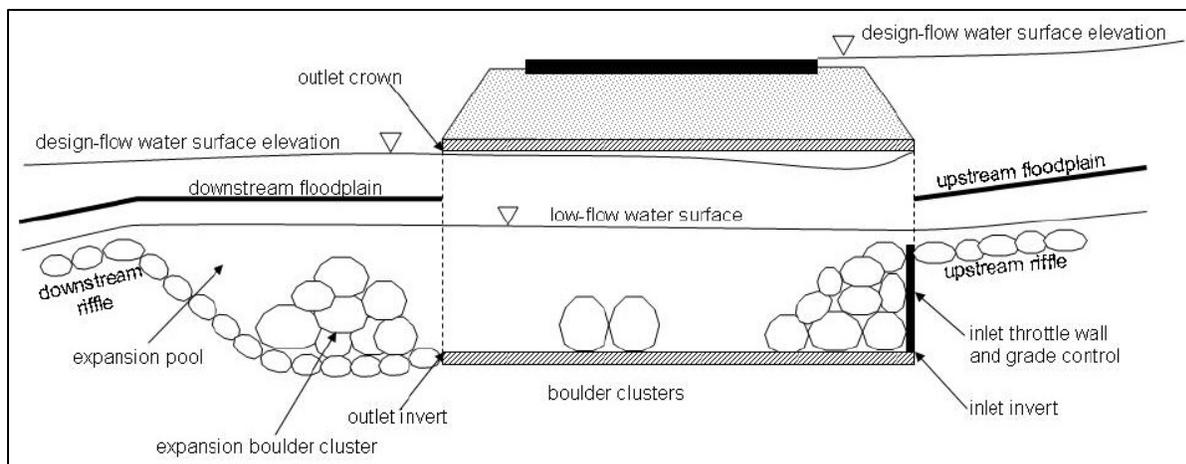


Figure 4.2 Profil en long type d'un ponceau à refoulement avec mise en place d'une cloison de rétention en amont de l'ouvrage (issu de Parola 2008)

Afin de garantir un refoulement efficace au regard du franchissement piscicole, les principales règles de dimensionnement sont mentionnées dans le document *Lignes directrices pour les traverses de cours d'eau au Québec* (Pêche et Océan 2016).

4.2 Ponceaux à cloisons

Il existe de nombreuses variantes de ponceaux à cloisons. Les dispositifs les plus connus sont les ponceaux à déversoirs (Rajaratman et al. 1986), les ponceaux à déversoirs perforés (Rajaratman et al. 1989), les cloisons offset (McKinley et al. 1956), les déflecteurs (Engel 1974) ou encore les cloisons latérales (Watts 1974). La diversité de dispositifs et de matériaux employables pour la réalisation des cloisons permet une adaptation à l'ensemble des types de ponceaux existants (Pêche et Océans 2016).

Les ponceaux à cloisons s'apparentent dans leur conception et leur mise en œuvre aux passes à poissons conventionnelles. L'objectif général est de modifier les conditions d'écoulement afin de les rendre compatibles avec les capacités de nage en sprint des espèces cibles (Kapitzke 2010). Les cloisons permettent d'augmenter la rugosité équivalente de l'ouvrage, réduire les vitesses d'écoulement et augmenter les profondeurs d'eau tout en favorisant une dissipation efficace de l'énergie. En ce sens il s'agit de **ponceaux à conception hydraulique**.

Comme dans le cas des ponceaux à refoulement, la ligne d'eau en aval de l'ouvrage est calée par la présence d'un seuil naturel ou aménagé (Larinier 2002, Pêche et Océans 2016). La fosse de dissipation formée permet à la fois de dissiper l'énergie excédentaire en aval de l'ouvrage et

de fournir une zone de repos aux poissons. La stabilité du seuil aval est donc encore une fois indispensable pour garantir la franchissabilité de l'aménagement.

- **Ponceaux à déversoirs et déversoirs perforés:** Le principe des ponceaux à déversoirs est de fragmenter la dénivelée formée par l'ouvrage en une série de petites chutes franchissables par les poissons. Les chutes successives, localisées au droit des déversoirs, sont séparées par des bassins de repos. Conçus en adéquation avec l'hydrologie et les capacités de franchissement des espèces ciblées, les déversoirs permettent d'augmenter les tirants d'eau et de réduire les vitesses d'écoulement dans l'ouvrage. Entre deux déversoirs, le bassin permet de dissiper l'énergie excédentaire provoquée par l'accélération de l'écoulement au droit de la chute. Dans le cas des déversoirs perforés, l'échancrure est formée à même le radier et la cloison possède une élévation réduite.

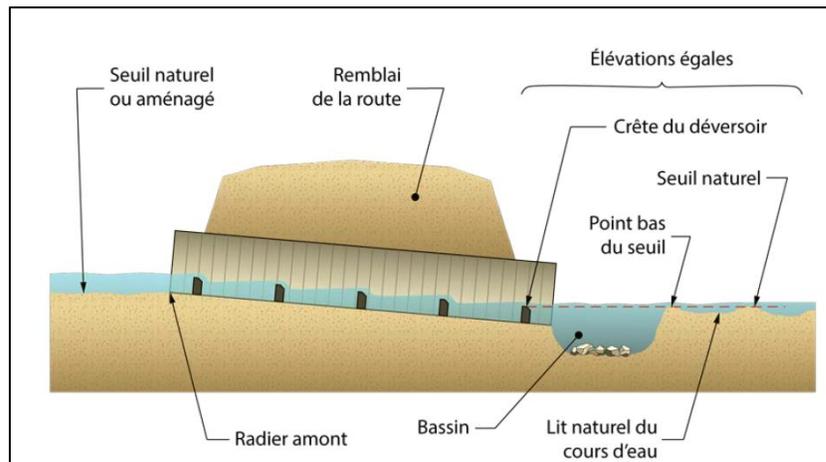


Figure 4.3 Profil en long type d'un ponceau à déversoirs (issu de Ministère des transports 2019)

- **Ponceaux à cloisons offset :** Tout comme les déversoirs perforés, les cloisons offset sont disposées à même le radier de l'ouvrage avec une ouverture permettant de conserver un écoulement continu. Le dispositif se différencie toutefois par l'inclinaison longitudinale des cloisons par rapport à l'écoulement qui favorise une orientation de celui-ci et favorise la présence de zones de repos (Larinier 2002, Kapitzke 2010). Cette conception est toutefois moins employée de nos jours au profit d'autres dispositifs, notamment dans les ponceaux circulaires (Rajaratman et al. 1989, Kapitzke 2010). La forme circulaire limite en effet les zones d'écoulement propices en basses eaux et favorise un marnage plus important des niveaux d'eau, préjudiciable à la dissipation

d'énergie en hautes eaux (Kapitzke 2010). Les cloisons offset sont par ailleurs difficilement installables dans les ponceaux en TTOG compte tenu de leur inclinaison.

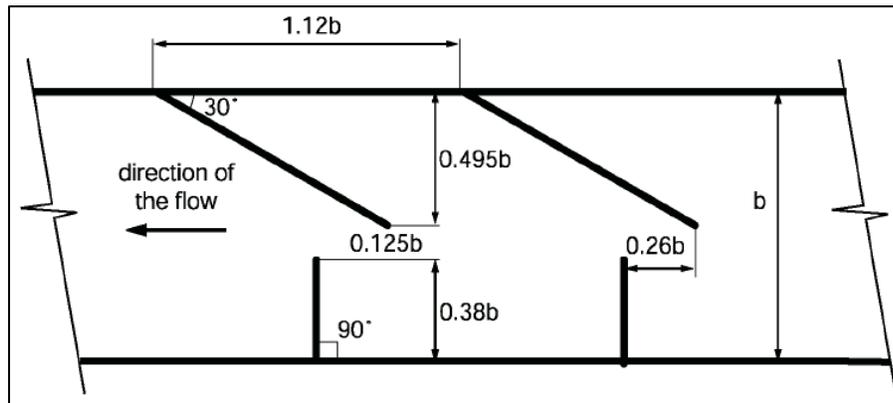


Figure 4.4 Dimensionnement type de cloisons offset (issu de Larinier 2002)

- **Ponceaux à cloisons latérales :** Dans cette configuration les cloisons sont disposées sur la ou les parois latérales des ponceaux afin d'augmenter la rugosité de l'ouvrage (Kapitzke 2010, O'Connor et al. 2017). En favorisant la présence de zones de faibles vitesses, ces ouvrages apparaissent plus favorables au franchissement des petites espèces et stades de développement (O'Connor et al. 2017).



Figure 4.5 Ponceau équipé de cloisons latérales (issu de O'Connor 2017)

- **Ponceaux à déflecteurs :** Les « spoilers » ont pour principal objectif d'augmenter la rugosité de l'ouvrage en disposant au fond de l'ouvrage des macro-rugosités régulièrement réparties (Larinier 2002, O'Connor et al. 2017). D'agencement et de formes adaptés au contexte, la présence de macro-rugosités favorise une augmentation du champ de faibles vitesses au fond de l'ouvrage et des zones de repos en aval de celles-ci (Rajaratnam et al. 1991, Feurich et al. 2011). Ce dispositif présente toutefois

une forte exposition aux embâcles et s'adapte mal aux variations des conditions hydrologiques (O'Connor et al. 2017).

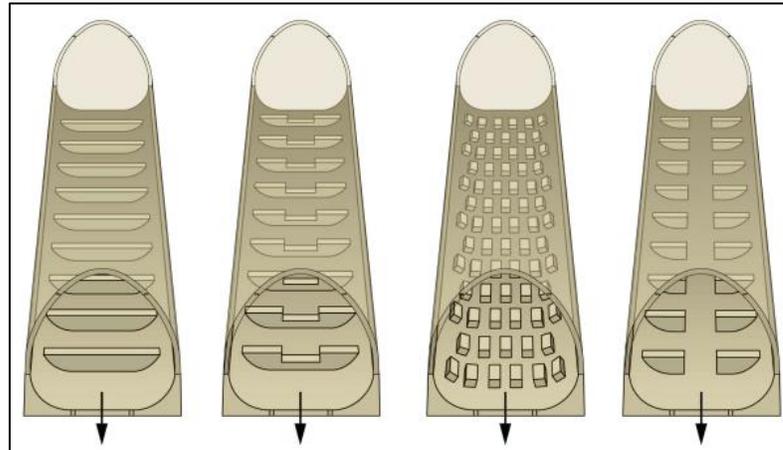


Figure 4.6 Types de déflecteurs pouvant être installés dans un ponceau (issus de Ministère des Transports du Québec 2019)

Compte tenu de la multitude de conceptions envisageables pour les différentes variantes de ponceaux à cloisons, les ouvrages de référence synthétisant les critères de conception sont présentés ci-dessous. Les principaux critères de dimensionnement concernent les caractéristiques géométriques des cloisons ainsi que leur fréquence. Le comportement hydraulique dans l'ouvrage tel que la forme du jet, la chute ou encore les vitesses d'écoulement est directement lié à ces paramètres.

Tableau 4.1 Épaisseur du matelas sédimentaire recommandé dans les ponceaux à simulation de cours d'eau en contour fermé

Titre	Auteurs	Année	Conception évoquée
Fish passage through culverts, rocks weirs and estuarine obstructions	Larinier M.	2002	Ponceaux à déversoirs, cloisons offset et spoiler
Design of road culverts for fish passage	Bates et al.	2003	Ponceaux à déversoirs et cloisons offset
Culvert Fishway Planning and design guidelines	Kapitzke R.	2010	Ponceaux à cloisons latérales et Offset
Lignes directrices pour les traversées de cours d'eau au Québec	Pêche et Océans Canada	2016	Déversoir à échancrure rectangulaire
Guidelines for fish passage at small structures	O'Connor et al.	2017	Ponceaux à cloisons latérales

Notons toutefois que si les cloisons permettent une augmentation des zones de faibles vitesses et une dissipation régulière de l'énergie, elles favorisent principalement le franchissement des grands migrateurs tels que les salmonidés (Johnson et al. 2012). Il apparaît en effet que les turbulences générées au niveau de celles-ci peuvent avoir un impact négatif sur le franchissement de certaines petites espèces et des juvéniles qui éprouvent des difficultés à se maintenir dans un environnement turbulent (Bates et al. 2003, Kapitzke 2010, Cabonce et al. 2018).

Le franchissement d'un obstacle est également conditionné par la motivation des poissons à le franchir. Cet aspect est de plus en plus étudié et les recherches tendent à montrer que des conditions hydrauliques favorables au franchissement suscitent une motivation plus faible chez les individus (Goerig et al. 2017, Duguay et al. 2017). A ce titre, les ponceaux lisses non aménagés entraînent des tentatives de franchissement plus rapides que les ouvrages équipés de cloisons, avec toutefois des taux de succès nettement inférieurs. La forme des cloisons et les conditions hydrauliques associées jouent également un rôle important sur l'attractivité de certaines espèces ou stades de développement. Les travaux de Duguay et al. (2018) ont ainsi mis en évidence les meilleures performances des salmonidés de grandes tailles dans les cloisons de type spoiler tandis que les cloisons déversoirs entraînent plus de tentative de franchissement chez les petites truites. Le développement de cloisons conciliant à la fois attractivité chez les espèces cibles et taux de succès au franchissement constitue en ce sens un domaine de recherche qu'il convient d'approfondir.

La mise en place de cloisons dans l'ouvrage influence également les performances hydrauliques de celui-ci. En condition de hautes eaux, les cloisons sont totalement submergées et leur influence sur l'écoulement s'exerce par augmentation de la rugosité équivalente de l'ouvrage. La capacité hydraulique de l'ouvrage est donc réduite par rapport à l'utilisation d'un ponceau sans dispositifs. La modélisation de la capacité hydraulique de l'ouvrage après aménagement nécessite alors l'estimation empirique de la rugosité équivalente, pour le débit d'intérêt et le type de cloisons employé (Rajaratnam et al. 1988, Rajaratnam et al. 1989, Rajaratnam et al. 1990(a), Rajaratnam et al. 1990(b), Rajaratnam et al. 1991, Lang et al. 2008). La présence de cloisons favorise également une augmentation de la ligne d'eau amont de l'ouvrage (Lang et al. 2008). Cette influence peut être minimisée en éloignant l'emplacement de la première cloison par rapport à l'entrée hydraulique de l'ouvrage, en favorisant des cloisons de faible hauteur et un espacement maximum.

L'aménagement de dispositifs permettant de maximiser les zones de faibles vitesses tout en limitant la turbulence générée et la perte de capacité hydraulique associée dans l'ouvrage présentent un intérêt grandissant (Watson et al. 2018).

À ce titre, l'utilisation de ponceaux à cloisons est généralement recommandée lorsque le coût ou la mise en œuvre d'un autre type d'aménagement n'est pas envisageable, compte tenu de leur sélectivité et de l'entretien qu'ils requièrent (Larinier 2002, Hansen et al. 2009 Pêche et Océan 2016). Leur utilisation peut toutefois être préconisée pour l'aménagement de nouvelles installations (O'Connor et al. 2017) mais l'approche doit être considérée comme une mesure temporaire selon Bates et al. (2003).

4.3 Considérations techniques relatives au transit des sédiments et des embâcles

De façon surprenante, la littérature traitant du transit sédimentaire et des embâcles dans les ponceaux à refoulement ou à cloisons est relativement restreinte. La majorité des efforts de recherche est axée sur les risques d'incisions et d'affouillements localisés aux abords de l'ouvrage.

Dans le cas des ponceaux à cloisons, la littérature ayant attiré à l'engravement des passes à poissons conventionnelles ne présente qu'un intérêt limité compte tenu des faibles volumes de bassins dans les ponceaux et de l'impossibilité de détourner une partie du débit en période de transit important (by-pass).

4.3.1 Ponceaux à refoulements

La conception des ponceaux à refoulement est uniquement favorable au transport de sédiments de taille inférieure ou égale aux sables (Timms et al. 2017). Dans cette étude, les auteurs ont effectivement mis en évidence la présence de sédiments de tailles plus importantes et diversifiées en amont des ouvrages. La rétention de matériaux dans l'ouvrage n'a toutefois pas été caractérisée.

Contrairement aux ponceaux à cloisons, les ponceaux à refoulement ne présentent pas de dispositifs au sein de l'ouvrage. En ce sens, cette conception est moins sensible à l'accumulation de sédiments et d'embâcles (California Fish and Game 2007). Le cas échéant, l'entretien à réaliser est également facilité.

4.3.2 Ponceaux à cloisons

En parallèle des contraintes liées à la sélectivité des ouvrages ou à la réduction de capacité hydraulique, les conceptions hydrauliques favorisent de manière générale une accumulation de sédiments et de débris, notamment en période de faibles débits (Hansen et al. 2009). Ce constat s'explique d'une part par la réduction volontaire des vitesses favorables aux dépôts, mais également par la constriction des écoulements aux passages des cloisons favorables aux embâcles. Un entretien régulier des ponceaux à cloisons s'avère bien souvent nécessaire avec à terme un coût budgétaire et organisationnel non négligeable.

Cette accumulation de matériaux peut pénaliser l'efficacité du dispositif selon plusieurs modalités :

L'accumulation d'embâcles provoque une barrière physique au passage des poissons.

La présence d'embâcles ou de dépôts sédimentaires modifie les conditions d'écoulement et entraîne donc une inadéquation avec les capacités de nage des espèces cibles (Lang et al. 2008). Le remplissage de sédiments diminue notamment la rugosité relative de l'ouvrage et l'engravement des bassins limite la dissipation d'énergie.

- La présence de dépôts sédimentaire en aval des cloisons limite également l'accès aux zones de faibles vitesses situées à ce niveau (Rajaratman et al. 1990)
- Certains dispositifs sont moins sensibles à l'accumulation de matériaux. En maintenant une zone d'écoulement sans cloisons, les ponceaux à cloisons latérales sont plus favorables au libre transit des sédiments et des embâcles (Kapitzke 2010). Les écoulements hélicoïdaux présents dans les dispositifs offset favorisent également un autocurage des sédiments (Kapitzke 2010).

La conception du dispositif entraîne également une influence sur l'accumulation de matériaux dans le ponceau. Celle-ci est principalement localisée dans la partie amont du dispositif dans la mesure où la première cloison joue un rôle de blocage sur le profil du cours d'eau (Lang et al. 2008). Afin de favoriser les propriétés d'autocurage du dispositif, il est conseillé de favoriser une pente de l'ouvrage supérieure ou égale à 1.25 % pour en éviter l'ensablement (Lang et al. 2008, Pêche et Océan 2016). Il convient également de trouver un compromis entre les conditions hydrauliques favorisant le franchissement des espèces cibles et des forces de cisaillement suffisantes pour limiter les dépôts (California Department of Fish and Wildlife 2009). Des cloisons de hauteur restreinte et d'espacement plus important permettent en effet de limiter l'accumulation de matériaux (Lang et al. 2008). Une largeur d'ouvrage supérieure à 80 % de la

largeur plein-bord du cours d'eau permet enfin de restreindre l'accumulation d'embâcle en amont et de faciliter les opérations d'entretien par les opérateurs (Pêche et Océans 2016).

Duguay et al. (2018) ont toutefois démontré l'effet bénéfique des sédiments présents en aval des cloisons à déversoir. Leur accumulation limite en effet la formation de courants de recirculation dans le ressaut hydraulique en aval de ceux-ci. En l'absence de substrat, ces courants de recirculation génèrent une turbulence excessive qui peut être préjudiciable à l'exploitation des zones de faibles vitesses par certaines espèces, dans le cas présent des juvéniles de truites arc-en-ciel *Oncorhynchus mykiss*.

5 Recommandations

Les ponceaux, lorsque ceux-ci ne sont pas adéquatement conçus ou installés, peuvent entraîner une multitude d'impacts sur les écosystèmes aquatiques. Malgré l'importance essentielle de préserver la fonctionnalité des mouvements piscicoles et les processus morphodynamiques, le choix et la conception des ponceaux restent étroitement liés aux contraintes budgétaires. La priorisation des actions d'aménagement constitue une approche indispensable afin de maximiser l'efficacité des investissements (Lin et al. 2020). La mise en relation des objectifs de restauration biologiques et morphologiques avec les problématiques de risques d'inondation constitue à ce titre une réelle opportunité (Communication personnelle Mathews 2020).

De plus, les contraintes budgétaires favorisent bien souvent une considération des aménagements à court terme (O'Shaughnessy et al. 2016). Bien que les coûts initiaux des ouvrages de type simulation de cours d'eau puissent s'avérer rédhibitoires, les bénéfices procurés par ces ouvrages sur la fonctionnalité biologique, hydraulique, l'allongement de la durée de vie des ouvrages ou encore la réduction des contraintes d'entretien favorisent une rentabilité à long terme par rapport aux ouvrages conventionnels (Gillespie et al. 2014 Christiansen et al. 2014, O'Shaughnessy et al. 2016). En ce sens, il apparaît indispensable d'inclure le coût à l'échelle de la durée de vie d'un ouvrage comme référence dans l'analyse multicritères des aménagements (Hansen et al. 2009).

Notons également que la conception hydraulique s'avère limitante quant au potentiel de franchissement piscicole et de transit sédimentaire. Il apparaît donc préférable de considérer ces méthodes comme un aménagement palliatif et temporaire (Bates et al. 2003)

Il convient également de noter que la majorité des études réalisées sur les ponceaux se sont principalement concentrées sur l'effet de la fragmentation des habitats (Pepino et al. 2012 ; MacPherson et al. 2012), l'évaluation du franchissement piscicole (Bourne et al. 2011) ou encore les critères de conception des ouvrages favorables aux franchissements piscicoles. L'efficacité du franchissement piscicole dans les passes à poissons ou encore leur exposition à l'engravement est également relativement bien documenté (Laine et al. 2002, Cooke et al. 2013).

Surprenamment, il existe relativement peu d'études permettant d'évaluer spécifiquement l'efficacité des aménagements visant à rétablir la continuité du franchissement piscicole.

Lorsque celle-ci existe, l'évaluation est principalement réalisée en mesurant la présence/absence de certaines espèces ou encore la richesse et la densité spécifique aux abords de l'ouvrage (Timm et al. 2017). Ces méthodes ne se révèlent toutefois pas spécifiques pour l'évaluation des dispositifs de franchissement puisque de nombreux paramètres biotiques et abiotiques peuvent influencer sur les résultats (MacPherson et al. 2012). L'évaluation spécifique du franchissement d'ouvrages par suivis télémétrique ou visuel reste anecdotique (Goerig et al. 2017, Constantin 2017) ou réservée aux opérations de laboratoire (Johnson et al. 2019), notamment en raison de la complexité et du temps de mise en œuvre.

Notons enfin que l'aspect du transit sédimentaire reste considéré de façon secondaire dans la conception des ponceaux, hors simulation de cours d'eau. La libre circulation des sédiments constitue toutefois la clef de voute du fonctionnement morpho-dynamique des cours d'eau. Son déséquilibre peut entraîner une série d'impacts sur l'ensemble des compartiments biologiques, morphologiques ou encore l'intégrité structurelle de l'ouvrage, avec des effets souvent complexes et irrémédiables.

6 BIBLIOGRAPHIE

- Abbs T.J., J.A. Kells & C. Katopodis (2007) A model study of the hydraulics related to fish passage through backwatered culverts. Proceedings of the 18th Canadian Hydrotechnical Conference, Winnipeg, Manitoba, 22-24 August. 13 p.
- Adams S.B. & M.L. Warren Jr. (2005) Recolonization by Warmwater Fishes and Crayfishes after Severe Drought in Upper Coastal Plain Hill Streams. Transaction of the American Fisheries Society. 134:1173–1192. DOI : 10.1577/T04-089.1.
- Arsenault M. & A. Curry (2020 : In progress) Watershed-Scale connectivity analysis : an applied GIS model towards the strategic management of barriers to Atlantic Salmon migration. University of New Brunswick.
- Aust. W.M, M.B. Carroll, M.C. Bolding & C.A. Dolloff (2011) Operational forest stream crossings effects on water quality in the Virginia piedmont. Southern Journal of Applied Forestry. 35(3):123–130. DOI : 10.1093/sjaf/35.3.123.
- Bates K., B. Barnard, B. Heiner, J.P. Klavas & P.D. Powzers (2003) Design of Road Culverts for Fish Passage. Olympia : Washington Department of Fish and Wildlife, 112 p.
- Baudoin J.M., V. Burgun, M. Chanseau, M. Larinier, M. Ovidio, W. Sremski, P. Steinbach & B. Voegtle (2014) Information sur la Continuité Ecologique – ICE : Evaluer le franchissement des obstacles par les poissons – Principe et méthodes. Comprendre et agir. 200 p.
- Barnard B. (2003) Evaluation of the stream simulation culvert design method in Western Washington, a preliminary study. Washington Department of Fish and Wildlife : Olympian W.A. 25p.
- Barton B.A. (1977) Short-term effects of highway construction on the limnology of a small stream in southern Ontario. Freshwater Biology. 7:99-108. DOI : 10.1111/j.1365-2427.1977.tb01661.x
- Benton P.D., W. E. Ensign & B.J. Freeman (2008) The effect of Road Crossing on Fish Movements in Small Etowah Basins Streams. Southeastern Naturalist. 7(2):301-310. DOI : 10.1656/1528-7092(2008)7[301:TEORCO]2.0.CO;2
- Bérubé P., M. Dubé, J. Robitaille, Y. Grégoire & S. Delisle (2010) L'effet à long terme des chemins forestiers sur la sédimentation. Note technique n°11 Direction de l'Environnement et de la protection des forêts. 4p.
- Bocking E., D.J. Cooper & J. Price (2017) Using tree ring analysis to determine impacts of a road on a boreal peatland. Forest Ecology and Management. 404:24-30. DOI : 10.1016/j.foreco.2017.08.007.
- Bourne C.M., D.G. Kehler, Y.F. Wiersma & D. Cote (2011) Barriers to fish passage and barriers to fish passage assessments : the impact of assessment methods and assumptions on barrier identification and quantification of watershed connectivity. Aquatic Ecology. 45: 389-403. DOI: 10.1007/s10452-011-9362-z.
- Bouska W.W. & C. P.Paukert (2010) Road Crossing Designs and Their Impact on Fish Assemblages of Great Plains Streams. Transactions of the American Fisheries Society. 139 (1):214-222. DOI: 10.1577/T09-040.1.

Burford D.D., T.M. McMahon, J.E. Cahoon & M. Blank (2009) Assessment of Trout Passage through Culverts in a Large Montana Drainage during Summer Low Flow. *North America Journal of Fisheries Management*. 29:739-752. DOI: 10.1577/M07-175.1.

Briggs A.S. & T.L. Galarowicz (2013) Fish Passage through Culverts in Central Michigan Warmwater Streams. *North American Journal of Fisheries Management*. 33:652-664. DOI : 10.1080/02755947.2013.788589.

Bruton M.N. (1985) The effects of suspensoids on fish. *Hydrobiologia*. 125:221-241. DOI : 10.1007/978-94-009-5522-6_16

Cabonce J., H. Wang & H. Chanson (2018) Ventilated corner baffles to assist upstream passage of small-bodied fish in box culverts. *American Society of Civil Engineers*. 144(8): 3-8. DOI : 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001329

California Department of Fish and Wildlife (2009) California salmonid stream habitat restoration manual – Part XII Fish passage design and implementation. 189 p.

California Fish and Game (2007) Fish Passage Design for Road Crossings : An Engineering Document Providing Fish Passage Design Guidance for Caltrans Projects. 13 p. + annexes.

Cenderelli D.A., K. Clarkin, R.A. Gubernik & M. Weinhold (2011) Stream Simulation for Aquatic Organism Passage at Road-Stream Crossings. *Journal of the Transportation Research Board*. 2203 (1):36-45 DOI : 10.3141/2203-05.

Communication personnelle : Mathews B. & M.P. Wynne. (January 14-15, 2020) The Anatomy of Watershed Scale Restoration. The 2020 Atlantic Salmon Ecosystems Forum. University of Maine Oronon Maine USA.

Constantin P.M. (2017) Analyse du comportement spatial de l'omble de fontaine (*Salvelinus Fontinalis*) dans un ponceau ondulé par suivi vidéo à éclairage infrarouge. *Institut National de la Recherche Scientifique*. 107 p. + annexes.

Cooke S.J. & S.G. Hinch (2013) Improving the reliability of fishway attraction and passage efficiency estimates to inform fishway engineering, science, and practice. *Ecological Engineering*. 58:123-132. DOI : 10.1016/j.ecoleng.2013.06.005

Clark S.P., J.S. Toews & R. Tkach (2014) Beyond average velocity : modelling velocity distribution in partially filled culverts to support fish passage guidelines. *International Journal of River Basin Management*. 12:101-110. DOI : 10.1080/15715124.2013.879591.

Clarkin K., A. Connor, M.J. Furniss, B. Gubernik, M. Love, K. Moyann, S. WilsonMusser (2005) National inventory and assessment procedure : For identifying Barriers to Aquatic Organism Passage at Road-Stream Crossings. U.S. Department of Agriculture Forest Service. 60 p.

Coffman J.S. (2005) Evaluation of a Predictive Model for upstream Fish Passage Through Culverts. James Madison University. 104 p.

Cook S.J. & S.G. Hinch (2013) Improving the reliability of fishway attraction and passage efficiency estimates to inform fishway engineering, science, and practice. *Ecological Engineering*. 58:132-132. DOI : 10.1016/j.ecoleng.2013.06.005

Constantin P.M. (2017) Analyse du comportement spatial de l'omble de fontaine (*Salvelinus Fontinalis*) dans un ponceau ondulé par suivi vidéo à éclairage infrarouge. *Institut National de la Recherche Scientifique*. 107 p. + annexes.

Contech Engineered Solutions. I-series™ Invert Technology. En ligne : <https://www.conteches.com>. Consulté le 25/02/2020.

- Christiansen C., A. Filer, M. Landi, E. O'Shaughnessy, M. Palmer & T. Schwartz (2014) Cost-Benefit Analysis of Stream-Simulation Culverts. Wisconsin Department of Natural Resources. 97 p.
- Craveiro J., J. Bernardino, A. Mira & P.G. Vaz (2019) Impact of culvert flooding on carnivore crossings. *Journal of Environmental Management*. 231:878-885. DOI : 10.1016/j.jenvman.2018.10.108.
- Crookston B.M. & B.P. Tullis (2012) Scour prevention in bottomless arch culverts. *International Journal of Sediment Research*. 27(2):213–225. DOI : 10.1016/S1001-6279(12)60029-8.
- Dole J.W., R.M. Sauvajot, S.P.S. Riley & T.J. Valone (2004) Use of highway undercrossings by wildlife in southern California. *Biological Conservation*. 115: 499-507. DOI : 10.1016/S0006-3207(03)00166-6.
- Duguay J.M., R.W.J. Lacey & T. Castro-Santos (2017) Influence of baffles on upstream passage of Brook Trout and Brown Trout in an experimental box culvert. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 76(1):28-41. DOI : 10.1139/cjfas-2017-0453
- Duguay J.M., B. Foster, R.W.J. Lacey & T. Castro-Santos (2018) Sediment infilling benefits rainbow trout passage in a baffled channel. *Ecological Engineering* 125 : 38-49. DOI : 10.1016/j.ecoleng.2018.10.003
- Engel P. (1974) Fish passage facilities for culverts of the Mackenzie Highway. Canada Center for Inland Waters, Burlington, Ontario. 36 p.
- Feurich R., J. Boubée & N.R.B. Olsen (2011) Spoiler baffles in circular culverts. *Journal of environmental engineering*. 137(9):854-857. DOI : 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000384.
- Foltz R.B., K.A. Yanosek & T.M. Brown (2007) Sediment concentrations and turbidity changes during culvert removals. *Journal of Environmental Management*. 87:329-340. DOI : 10.1016/j.jenvman.2007.01.047
- Fuller M.R., M.W. Doyle & D.L. Strayer (2015) Causes and consequences of habitat fragmentation in river network. *New York Academy of Sciences*. 1355:31-51. DOI 10.1111/nyas.12853.
- Furniss M., M. Love, S. Firor, K. Moynan, A. Llanos, J. Guntle & R. Gubernick (2006) FishXing, Version 3.0. US Forest Service, San Dimas Technology and Development Center, San Dimas, CA. Disponible : <https://www.fs.fed.us/biology/nsaec/fishxing/index.html>
- Gassman S.L., I. Sananakul, C.E. Pierce, E. Gheibi, R. Starcher, W. Ovalle & M. Rahman (2017) Failure of pipe culverts from a 1000-year rainfall event in South Carolina. *Geotechnical Frontiers*. 277:114-124. DOI : 10.1061/9780784480441.013
- Gibson R.J., R.L. Haedrich & C.M. Wernerheim (2005) Loss of fish habitat as a consequence of Inappropriately Constructed Stream Crossings, *Fisheries*, 30(1):10-17, DOI : 10.1577/1548-8446(2005)30[10:LOFHAA]2.0.CO.
- Gilbert K., V. Larocque, O. Ferland & S. Jutras (2019) Envisioning a New Way of Managing Low-Volume Roads in Québec, Canada : Impact of decommissioning on sediment yield. 12th International Conference on Low-Volume Roads. 109-113.
- Goerig E., N.E. Bergeron & T. Castro-Santos (2017) Swimming behaviour and ascent paths of brook trout in a corrugated culvert. *River Research and Application* 73: 94 -104. DOI : 10.1002/rra.3187.

Goerig E., T. Castro-Santos & N.E. Bergeron (2016) Brook trout passage performance through culverts. *Canadian Journal of Fisheries Aquatic Sciences*. 73: 94 -104. DOI : 10.1139/cjfas-2015-0089.

Goodridge W.H. & W.J. Rahmeyer (2011) Culvert design for flood routing considering sediment transport. *Proceedings of the 34th World Congress of the International Association for Hydro-Environment Research and Engineering: 33rd Hydrology and Water Resources Symposium and 10th Conference on Hydraulics in Water Engineering*.

Gouvernement du Québec. (1997). *L'aménagement des ponts et ponceaux dans le milieu forestier*. 146 p.

Gillespie N., A. Unthank, L. Campbell, P. Anderson, R. Gubernick, M. Weinhold, D. Cenderelli, B. Austin, D. McKinley, S. Wells & J. Rowan (2014) Flood effects on road-stream crossing infrastructure : economic and ecological benefits of stream simulation designs. *Fisheries*. 39(2):62-76. DOI : 10.1080/03632415.2013.874527.

Gubernik R.A., D.A. Cenderelli, K.K. Bates, D.K. Johansen, S.D. Jackson (2008) *STREAM SIMULATION : An Ecological Approach To Providing Passage for Aquatic Organisms at Road-Stream Crossings*. Forest Service-Simulation Working Group. 460 p. + annexes.

Hansen B., J. Nieber, C. Lenhart (2009) Cost analysis of alternative culvert installation practices in Minnesota. Report to the Minnesota Department of Transportation, University of Minnesota. 49p. + annexes.

Hernick M., C. Lenhart, J. Kozarek & J. Nieber (2019) *Minnesota Guide for Stream Connectivity and Aquatic Organism Passage Through Culverts*. Minnesota department of Transportation. 221 p.

Hotchkiss R.H., C.M. Frei (2007) Design for fish passage Roadway-stream Crossings : synthesis report. Federal Highway Administration. 280 p.

Hunt J.H., S.M. Zerges, B.C. Roberts & B. Bergendahl (2010) Culvert assessment and decision-making procedures manual for federal lands highway. Federal Highway Administration. 222 p.

Jackson S.D (2003) Ecological Considerations in the Design of River and Stream Crossings. *Proceeding of the International Conference on Ecology and Transportation*, North Carolina State University. 10 p.

Johnson E.G., W.H. Pearson, S.L. Southard & R.P. Mueller (2012) Upstream movement of juvenile coho salmon in relation to environmental conditions in a culvert test bed. *Transaction of the American Fisheries Society*. 141:1520-1531. DOI : 10.1080/00028487.2012.699013.

Johnson K., L.E. Wait, S.K. Monk, R. Rader. R. H. Hotchkiss & M.C. Belk (2019) Effects of substrate on movement patterns and behaviour of stream fish through culverts : An experimental approach. *Sustainability*. 11(2):1-13. DOI : 10.3390/su11020470.

Julien H.P. & N.E. Bergeron (2006) Effect of fine sediment infiltration during the incubation period on Atlantic salmon (*Salmo salar*) embryo survival. *Hydrobiologia*. 563:61-71. DOI : 10.1007/s10750-005-1035-2.

Kapitzke R. (2010) *Culvert Fishway Planning and Design Guidelines, Part G – Baffle Fishways for pipe culverts*. James Cook University. 2 : 46 p.

Khan B. & M.H. Colbo (2008) The impact of physical disturbance on stream communities : lessons from road culverts. *Hydrobiologia*. 600:229-235. DOI : 10.1007/s10750-007-9236-5.

- King C. (2017) Predicting failure of culverts and associated impacts in low order streams of northern Michigan. Open Access Master's Thesis. Michigan Technological University. 55 p. + annexes.
- Kilgore R.T., B.S. Bergendahi & R.H. Hotchkiss (2010) Culvert Design for Aquatic Organism Passage. Federal Highway Administration. Hydraulic Engineering Circular Number 26, first Edition. 234 p.
- Kornel K., J.S. Jones & S. Stein (2003) Bottomless culvert scour study : Phase I Laboratory report. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration Report No. 69 p.
- Kornel K. & J. Pagan-Ortiz (2007) Testing bottomless culverts. Public Roads 70. En ligne : <https://www.fhwa.dot.gov/publications/publicroads/07may/03.cfm>. Consulté le 15/01/2020.
- Kozarek J. & S. Mielke (2015) Sediment Transport through Recessed Culverts : Laboratory Experiments. Minnesota Department of Transportation. 106 p.
- Lachance S., M. Dubé, R. Dostie & P. Bérubé (2008) Temporal and spatial quantification of fine-sediment accumulation downstream of culvert in brook trout habitat. Transactions of the American Fisheries Society. 137:1826-1838. DOI: 10.1577/T06-169.1
- Laine A., T. Jokivirta et C. Katopodis (2002) Atlantic salmon, *Salmo salar* L., and sea trout, *Salmo trutta* L., passage in a regulated northern river-fishway efficiency, fish entrance and environmental factors. Fisheries Management and Ecology. 9:65-77. DOI : 10.1046/j.1365-2400.2002.00279.x.
- Lane P.N.J., J.S. Gary (2002) Impact of an unsealed forest road stream crossing : water quality and sediment sources. Hydrological processes. 16:2599-2612. DOI: 10.1002/hyp.1050.
- Lang M. & E. Cashman (2008) Influence of fish passage retrofits on culvert hydraulic capacity. California Department of Transportation. 113 p.
- Larinier M. (2002) Fish passage through culverts, rock weirs and estuarine obstructions. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture 364 suppl. : 119-134.
- Leeuwen C.H. A., K. Dalen, J. Musteh, C. Junge & L.A. Vøllestad (2018) Habitat fragmentation has interactive effects on the population genetic diversity and individual behaviour of a freshwater salmonid fish. River Research and Application. 34(1):60-68. DOI: 10.1002/rra.3226.
- Lemay G. (2010) Stream temperatures impacts of culverts and impervious areas. Master's Theses and Capstones. 576 p.
- Levine J. (2013) An economic analysis of improved road-stream crossing. The Nature Conservancy, Adirondack Chapter. 70 p.
- L'Hérault E., M. Allard, M. Lemay C. Barette & A.S. Carbonneau (2014) Investigations géotechniques, caractérisation du pergélisol et stratégie d'adaptation dans un contexte de changements climatiques pour la route d'accès et l'aéroport de Kangiqsualujjuaq. Pour le compte du Ministère des Transports du Québec. 53 p.
- Lian Y., & B.C. Yen (2003) Comparison of risk calculation methods for a culvert. Journal of Hydraulic Engineering. 129:140-152. DOI : 10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:2(140).
- Lin H-Y, K.F. Robinson & L. Walter (2020) Trade-offs among road-stream crossing upgrade prioritizations based on connectivity restoration and erosion risk control. River Research and Application. 36:37-382. DOI: 10.1002/rra.3593

- Liu H., F. Niu, Y. Niu & X. Yang (2014) Study on thermal regime of roadbed-culvert transition section along a high speed railway in seasonally frozen regions. *Cold Regions Science and Technology* 106-107, 216-231.
- Louhi P., M. Ovaska, A. Mäki-Petäys, J. Erkinaro & T. Muotka (2011) Does fine sediment constrain salmonid alevin development and survival? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 68: 1819-1826. DOI : 10.1139/f2011-106.
- Love M. & R.N. Taylor (2003) California Salmonid Stream Habitat Restoration Manual Part IX, Fish Passage Evaluation at Stream Crossings. California Department of fish and Game, Sacramento, CA : 100.
- Lucas M.C., E. Baras, T.J. Thom, A. Duncan & O. Slavik (2001) Migrations of Freshwater Fishes. Blackwell Science Ltd. 420 p.
- MacPherson L. M., M.G. Sullivan, A.L. Foote & C.E. Stevens (2012) Effects of Culverts on Stream Fish Assemblages in the Alberta Foothills. *North American Journal of Fisheries Management* 32:480-490. DOI: 10.1080/02755947.2012.686004.
- Makrakis S., T. Castro-Santos, M.C. Makrakis, R.L. Wagner & M.S. Adames (2012) Culvert in paved roads as suitable passage for Neotropical fish species. *Neotropical ichthyology*, 10(4):763-770. DOI : 10.1590/S1679-62252012000400009.
- McKay S.K., A.R. Cooper, M.W. Diebel, D. Elkins, G. Oldford, C. Roghair & D. Wiefelich (2017) Informing watershed connectivity barrier prioritization decisions : a synthesis. *River research and applications*, 33:847-862. DOI: 10.1002/rra.3021
- McKinley W.R. & R.C. Webb (1956) A proposed correction of migratory fish problems at box culverts. Washington Department of Fisheries, Washington, DC, Research Papers I(4).
- Ministère de l'Environnement du Nouveau-Brunswick (2012) Directives techniques de la modification des cours d'eau et des terres humides, 135 p.
- Morita K. & S. Yamamoto (2002) Effects of Habitat Fragmentation by damming on the persistence of Stream-Dwelling Charr Populations. *Conservation Biology*. 16(5) : 1318-1323. DOI : 10.1046/j.1523-1739.2002.01476.x.
- Ministère des Ressources Naturelles-MRN (2001) Saines pratiques : voirie forestière et installation de ponceaux, Caplan (Québec), gouvernement du Québec, Direction régionale de la Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine, code de diffusion 2001-3074, 27 p.
- Ministère des Transports (2019) Aménagements pour le libre passage du poisson – Modifications à l'inventaire et à l'inspection des structures. Info-structures n°A2019-16. 13 p.
- Najafi M. (2005) Trenchless Technology – Pipeline and utility design, construction and renewal. McGraw-Hill, New-York.
- Nathan L.R., A.A. Smith, A.B. Welsh & J.C. Vokoun (2018) Are culvert assessments scores an indicator of Brook Trout *Salvelinus fontinalis* population fragmentation ?. *Ecological Indicators*. 84:208-217. DOI : 10.1016/j.ecolind.2017.08.033.
- New York State Department of Transportation (2011) Highway Design Manual. Chapter 8: Highway Drainage. Revision 91, May 31, 2018. En ligne : https://www.dot.ny.gov/divisions/engineering/design/dqab/hdm/hdm-repository/chapt_08.pdf. Consulté le 28/03/2020.
- O'Connor J., I. Stuart & R. Campbell-Beschorner (2017) Guidelines for fish passage at small structures. Arthur Rylah Institute for Environmental Research. Technical Report Series N°276. Department of Environment, Land, Water and Planning. 31 p.

O'Shaughnessy E., M. Landi, S.R. Januchowski-Hartley & M. Diebel (2016) Conservation Leverage : Ecological Design Culverts also Return Fiscal Benefits. *Fisheries* 41(12):750-757. DOI : 10.1080/03632415.2016.1246875.

Paradis-Lacombe (2018) Caractérisation de l'état et de la durabilité des traverses de cours d'eau sur les Chemins forestiers. Mémoire de maîtrise en sciences forestières. Université Laval. 92 p.

Parker M.A. (2000) Fish passage : culvert inspection procedures. Watershed Restoration Technical Circular n°11.

Parola A.C. (2008) Pool simulation culvert design for fish passage World Environmental and Water Resources Congress 2008. American Society of Civil Engineers. 9 p. DOI : 10.1061/40976(316)625.

Pavlova A., L.B. Beheregaray, R. Coleman, D. Gilligan, K.A. Harrison, B.A. Ingram, J. Kearns, A.M. Lamb, M. Lintermans, J. Lyon, T.T.T. Nguyen, M. Sasaki, Z. Tonkin, J. D.L. Yen & P. Cunnucks (2017) Severe consequences of habitat fragmentation on genetic diversity of an endangered Australian freshwater fish : A call for assisted gene flow. *Evolutionary Applications*. 10:531-550. DOI : 10.1111/eva.12484.

Périer L., G. Doré & C.R. Burn (2015) Influence of water temperature and flow on thermal regime around culverts built on permafrost. *GéoQuébec 2015 Proceedings of the 68th Canadian Geotechnical Conference and the 7th Canadian Permafrost Conference, 20–23 September, Québec City, Québec, Canada* digital release. Canadian Geotechnical Society.

Pêches et Océans Canada (2016) Lignes directrices pour les traverses de cours d'eau au Québec. 73 pages + annexes.

Pépino M., M.A. Rodriguez & P. Magnan (2012) Impacts of highway crossings on density of brook charr in streams. *Journal of Applied Ecology*, 49:395-403. DOI : 10.1111/j.1365-2664.2012.02108.x

Rajaratnam N., G. Van Der Vinne & C. Katopodis (1986) Hydraulics of vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112:909-927. DOI : 10.1061/(ASCE)0733-9429(1986)112:10(909).

Rajaratnam N. & C. Katopodis (1990a) Hydraulics of Culvert Fishways III: Weir Baffle Culvert Fishways. *Canadian Journal Civil Engineering*. 16(5):774-777. DOI : 10.1139/90-064.

Rajaratnam N., C. Katopodis & M. Fairbairn (1990) Hydraulics of culvert fishways V: Alberta fish weirs and baffles. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 17:1015-1021. DOI : 10.1139/90-112.

Rajaratnam N., C. Katopodis & S. Lodewyk (1988) Hydraulics of offset baffle culvert fishways. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 15:1043-1051. DOI : 10.1139/88-137.

Rajaratnam N., C. Katopodis & S. Lodewyk (1991) Hydraulics of Culvert Fishways IV : Spoiler baffle culvert fishways. *Canadian Journal Civil Engineering*. 18:76-82. DOI : 10.1139/91-010.

Rajaratnam N., C. Katopodis & N. McQuitty (1989) Hydraulics of culvert fishways II: slotted weir culvert fishways. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 16: 375-383. DOI : 10.1139/89-061.

Richmond M.C., Z. Deng, G.R. Guensch, H. Tritico & W.H. Pearson (2007) Mean flow turbulence characteristics of full-scale spiral corrugated culvert with implications for fish passage. *Ecological Engineering*. 30:333-340. DOI : 10.1016/j.ecoleng.2007.04.011.

Rinella, D.J., D.L. Bogan (2003) Ecological impacts of Three Lower Kenai Peninsula, Alaska, ATV Stream Fords. Anchorage, AK: Alaska Department of Environmental Conservation. 34 p.

- Rodgers E.M., B.M. Heaslip, R.L. Cramp, M. Riches, M.A. Gordos & C.E. Franklin (2017) Substrate roughening improves swimming performance in two small-bodied riverine fishes : implications for culvert remediation and design. *Conservation physiology*. 5 : 10 p. DOI : 10.1093/conphys/cox034.
- Rothrock G. & K. Dubé (2007) Sediment source analysis North Fork Coeur d'Alene river subbasin. North Fork Coeur d'Alene Sediment Source Technical Report. 54 p.
- Rothwell R.L. (1983) Erosion and Sediment Control At Road-Stream Crossings. *The Forestry Chronicle*. 59(2):62-66. DOI : 10.5558/tfc59062-2.
- Saraswati S., R.M. Petrone, M.M. Rahman, G.J. McDermid, B. Xu & M. Strack (2020) Hydrological effects of resource-access road crossings on boreal forested peatlands. *Journal of Hydrology*. 584 : 1-45. DOI : 10.1016/j.jhydrol.2020.124748
- Schall J.D., P.L. Thompson, S.M. Zerges, R.T. Kilgore & J.L. Morris (2012) Hydraulic design of highway culverts third edition. Federal Highway Administration. 236 p.
- Timm A., D. Higgins, J. Stanovick, R. Kolka & S. Eggert (2017) Quantifying fish habitat associated with stream simulation design culverts in northern Wisconsin. *River Research and Application*. 33:567-577. DOI: 10.1002/rra.3117
- Torterotot J.B., C. Perrier, N.E. Bergeron, L. Bernatchez (2014) Influence of Forest Culverts and Waterfalls on the Fine-scale Distribution of Brook Trout Genetic Diversity in a Boreal Watershed. *Transactions of the American Fisheries Society*. 1436: 1577-1591. DOI: 10.1080/00028487.2014.952449.
- Warren M.L. & M.G. Pardew (1998) Road Crossings as Barriers to Small-Stream Fish Movement. *American Fisheries Society*, 127: 637-644. DOI : 10.1577/1548-8659(1998)127<0637:RCABTS>2.0.CO;2.
- Watson J.R., H.R. Goodrich, R.L. Cramp, M.A. Gordos & C.E. Franklin (2018) Utilising the boundary layer to help restore the connectivity of fish habitats and populations. *Ecological Engineering*. 122:286-294. DOI : 10.1016/j.ecoleng.2018.08.008.
- Watts F.J., (1974) Design of culvert fishways. Water Resources Research Institute, University of Idaho, Moscow, ID.
- Wissink K. M. McKee, R. Houghtalen & K. Sutterer (2005) Simple rating system for identification of failure-critical culverts and small structures. *Journal of the transportation research board*, 1928:226-229. DOI : 10.1177/0361198105192800124.
- Wofford J.E.B., R.E. Gresswell & M.A. Banks (2005) Influence of barriers to movement on within-watershed genetic variation of coastal cutthroat trout. *Ecological Applications*. 12(2):628-637. DOI: 10.1890/04-0095.
- Wyoming Department of transportation (2011) Road design Manual – chapter 3.06 Culvert design. 97 p.
- Zeh M. & W. Dönni (1994). Restoration of spawning grounds for trout and grayling in the river High-Rhine. *Aquatic Sciences*. 56(1):59-69. DOI : 10.1007/BF00877435.
- Zhang X. & X. Wang (2007) Impact of Railway Culvert Construction on the Ground Temperature of Foundation Soil in Permafrost Regions. Central South University, China.

