

# CONTRÔLE DE L'ÉROSION DES COURS D'EAU

## CHAPITRE 9

### 9.1 INTRODUCTION

L'érosion accrue dans les cours d'eau, qui est souvent observée lorsqu'un bassin versant s'urbanise, est importante à contrôler et à contrer puisqu'elle a souvent un impact non négligeable sur la qualité générale de l'eau dans le cours d'eau et parce qu'elle peut également affecter la nature et la qualité des habitats. Comme l'illustre la figure 9.1, l'interaction entre les différentes variables affectant les cours d'eau en milieu urbain est multiple et complexe, mais on connaît maintenant suffisamment les impacts négatifs du développement urbain pour reconnaître que des contrôles spécifiques pour minimiser l'érosion associée à l'augmentation des débits et volumes de ruissellement sont nécessaires. Ces contrôles sont distincts de ceux dé-

veloppés spécifiquement pour la qualité de l'eau et ceux qui ont trait au contrôle purement quantitatif, pour les débits se produisant plus rarement.

Lorsque des débits plus importants se rejettent sans contrôle avec de plus grandes vitesses dans les cours d'eau conséquemment à l'urbanisation d'un secteur, les cours d'eau verront typiquement leur forme et leurs dimensions se modifier pour tenter de s'adapter aux nouvelles conditions d'écoulement qui leur sont alors imposées. Les processus par lesquels la morphologie de ces cours d'eau se modifie sont l'érosion et la sédimentation. La dynamique hydrologique généralement élevée des bassins versants urbanisés fait en sorte que les processus sont rapides et il en résulte souvent une érosion accélérée, qui apporte

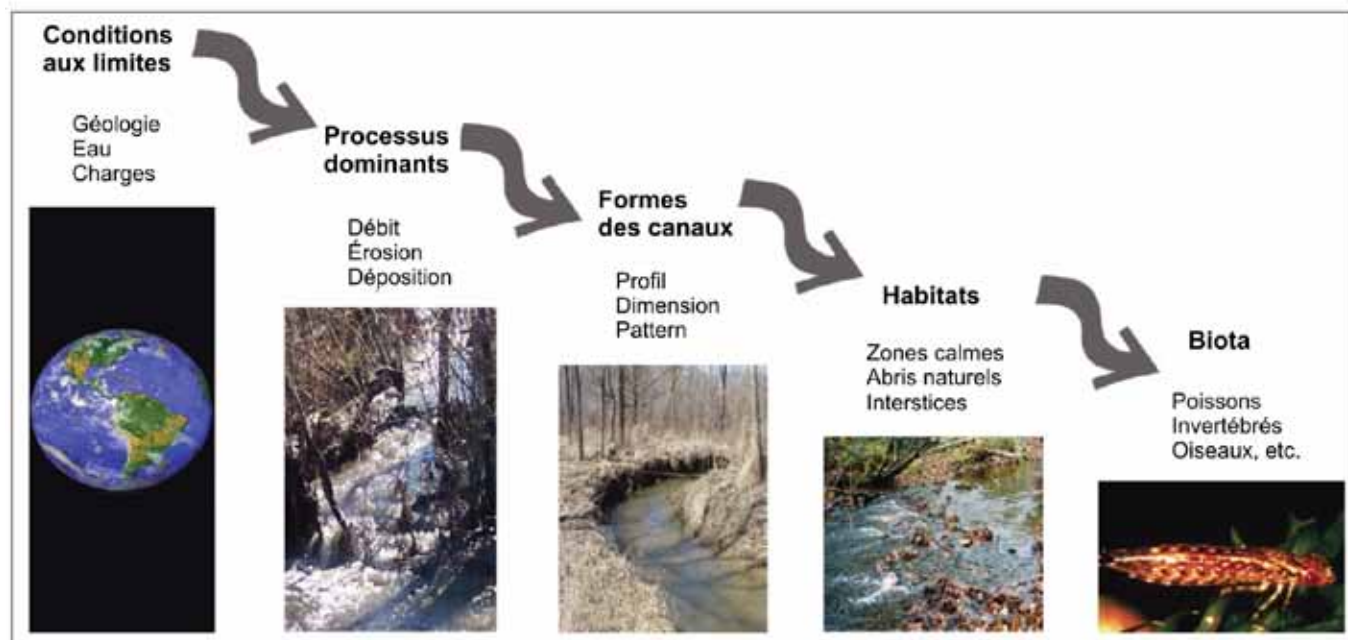


Figure 9.1 Relation des différentes variables et relation d'échelle pour l'équilibre des cours d'eau (adapté de DNR, Ohio, 2006).

davantage de sédiments dans les tronçons plus en aval et produit des conditions qui peuvent plus difficilement servir de support à des habitats sains.

Quoique la réhabilitation des cours d'eau dégradés soit possible, les coûts souvent élevés et les difficultés à effectuer ces travaux dans un environnement bâti font qu'il est souvent plus avisé de prévenir le développement de problèmes comme ceux montrés à la figure 9.2. Par ailleurs, il va sans dire que l'urbanisation peut ne pas être la seule responsable de l'érosion observée et qu'un **programme de contrôle de l'érosion des cours d'eau devra dans plusieurs cas être discuté et planifié à l'échelle d'un bassin versant.**



**Figure 9.2** Érosion dans un cours d'eau dans un milieu bâti, rendant difficiles les interventions.

Les conditions initiales des cours d'eau avant le développement varient pour chaque site et c'est pourquoi la première étape d'un programme de contrôle de l'érosion sera de procéder à une évaluation des conditions géomorphologiques. Bien entendu, les conditions existantes ne seront pas toujours le meilleur point de référence (les conditions ayant pu se dégrader sur une période de plusieurs années) et c'est pourquoi certains outils, comme des conditions de référence ou un système de classification des cours d'eau, peuvent être très utiles pour comparer les conditions observées à des formes stables ou en équilibre.

La présente section discutera de certains principes de base concernant la géomorphologie des cours d'eau et des méthodes d'analyses qui sont disponibles pour l'évaluation et le contrôle de l'érosion dans les cours d'eau urbains. Les techniques de réhabilitation et de protection ne seront pas abordées de façon très détaillée mais on pourra

consulter les références fournies à la fin du chapitre. De plus, on ne discutera pas ici des méthodes de contrôle d'érosion pendant la période de construction, méthodes qui devraient faire partie d'un programme général dans chaque municipalité. Comme le précisait le chapitre 8, l'apport en sédiments dans un secteur en construction peut être significatif et entraîner des impacts importants dans les cours d'eau récepteurs. Il y a donc lieu de prévoir, lors des travaux d'aménagement, des contrôles pour conserver et gérer le plus possible les sédiments sur le site. Plusieurs guides nord-américains abordent de façon détaillée cet aspect (GGHA, 2006; Alberta Transportation, 2003; Calgary, 2001; Goldman *et al.*, 1986; Barr, 2001; Schueler et Brown, 2004; CASQA, 2004; MTO, 1997; DNR, Ohio, 2006).

Après une discussion des concepts généraux et la présentation d'un système de classification des cours d'eau à la section 9.2, on retrouvera à la section 9.3 une description des points à considérer pour une évaluation des conditions d'érosion et une présentation des différentes techniques disponibles pour la réhabilitation de cours d'eau qui sont déjà affectés par de l'érosion. Il faut en effet reconnaître qu'une stratégie globale de contrôle de l'érosion, qui sera abordée à la section 9.4, pourra dans plusieurs cas comprendre à la fois des interventions sur le cours d'eau pour le protéger localement et le recours à d'autres techniques de gestion pour le contrôle des apports dans le bassin versant. La section 9.5 présentera finalement les approches, simplifiées ou détaillées, qui sont recommandées pour le contrôle de l'érosion par des pratiques de gestion optimale.

## 9.2 CONCEPTS GÉNÉRAUX

### 9.2.1 Impacts du développement urbain sur les cours d'eau et principes généraux de contrôle

L'objectif global des mesures de gestion des eaux pluviales pour le contrôle du potentiel d'érosion des cours d'eau est de préserver ou de recréer un système stable avec le maintien de ses habitats et de sa valeur esthétique tout en répondant aux besoins du développement. Puisque les processus en cause sont souvent de nature dynamique, on peut de façon générale parler d'équilibre hydro-sédimentaire qu'on doit tenter de préserver ou de rétablir. L'urbanisation d'un territoire affectera non seulement les apports hydrologiques mais également ceux en sédiments; la mise en place de bassins de rétention aura par ailleurs un

impact non seulement sur le régime hydrologique mais aussi sur la quantité et la nature des sédiments qui seront acheminés vers les cours d'eau. Il y a évidemment une interaction entre les aspects hydrologiques et les aspects sédimentaires et un programme de contrôle d'érosion doit nécessairement prendre en compte ces interrelations.

Hollis (1975) a étudié l'impact de l'urbanisation sur la fréquence des débits observés. Les principales conclusions sont les suivantes :

- Les débits pour des périodes de retour de 1 an ou plus longues n'étaient pas affectés pour un pourcentage imperméable dans le bassin versant d'approximativement 5 %. Par ailleurs, pour des conditions typiques d'urbanisation (environ 30 % imperméable), les débits 1 dans 100 ans pouvaient doubler en ampleur à cause des volumes de ruissellement accrus.
- L'effet hydrologique de l'urbanisation tend à décliner, relativement, pour des récurrences moins fréquentes. L'ampleur des changements pour les débits se produisant plus fréquemment (par exemple avec une période de retour de 1 dans 2 ans) sera plus importante que pour des débits d'occurrence plus rare.

D'autres études ultérieures ont par ailleurs démontré que les débits de plein bord (*bankfull discharges*) peuvent se produire beaucoup plus souvent dans le cas d'un bassin versant urbanisé que pour un bassin non développé. Cet aspect est essentiel à prendre en compte puisque les débits de plein bord sont depuis longtemps considérés comme un paramètre important influençant la forme et les caractéristiques des cours d'eau (Wolman et Miller, 1960; Dunne et Leopold, 1978). Pour plusieurs cours d'eau en conditions naturelles, la période de retour associée à ce débit de plein bord se situe souvent autour de 1 dans 1,5 an; cependant, lorsque le développement urbain s'accroît, ces débits peuvent se produire beaucoup plus souvent (plusieurs fois par année), ce qui contribuera à une accélération de l'érosion. Shaver *et al.* (2007) fournissent une excellente discussion sur les impacts physiques associés à l'érosion dans les cours d'eau et sur les conséquences quant à l'intégrité des habitats.

Les connaissances et critères de contrôle ont beaucoup évolué depuis une dizaine d'années et les différentes approches s'appuient maintenant à la fois sur les aspects géomorphologiques et sur les techniques de gestion des eaux pluviales. Un principe fondamental qui est main-

tenant démontré par plusieurs travaux de recherche est que le contrôle uniquement des débits de pointe, qui a été appliqué depuis les 30 dernières années, n'est pas suffisant pour assurer la stabilité des cours d'eau; la durée et la fréquence des plus petits débits peuvent en effet affecter la stabilité autant que l'ampleur des débits. De plus, comme les débits 1 dans 1,5 an se produisent plus souvent après l'urbanisation, la tendance actuelle est plutôt de contrôler à un niveau 1 dans 1 an, ce qui permet de compenser le fait que les débits pouvant affecter la morphologie des cours d'eau se produisent plus souvent.

Idéalement, l'objectif de base qui devrait donc être adopté serait de reproduire après le développement le régime hydrologique complet qui prévaut dans des conditions naturelles. En pratique, il peut être difficile d'atteindre cet objectif mais on doit au moins reconnaître qu'il est tout aussi important de contrôler les plus faibles débits (qui ont un impact sur l'érosion et la qualité des habitats) que les débits plus importants. En ce qui concerne le régime naturel de débits, Poff *et al.* (1997) ont identifié cinq composantes qui peuvent influencer les écosystèmes en rivière : l'ampleur des débits, leur fréquence, leur durée, leur distribution dans le temps et le taux de changements. Évidemment, tous ces paramètres sont affectés par le développement urbain et ils pourront avoir des impacts variables selon l'ampleur des changements hydrologiques et également selon le type de cours d'eau et ses caractéristiques géomorphologiques.

La section qui suit présentera certains principes de base qui devraient guider l'élaboration d'un programme de contrôle de l'érosion. L'étude de la géomorphologie des cours d'eau est toutefois un vaste domaine et certaines publications pourront être consultées pour approfondir ces aspects au besoin (Dunne et Leopold, 1978; Rosgen, 1996; FISRWG, 1998). La section 9.2.3, sans prétendre encore là fournir un traitement exhaustif de cet aspect, décrira par la suite brièvement la classification des cours d'eau proposée par Rosgen (Rosgen, 1994), ce qui permettra de mettre en évidence certains éléments et d'encadrer les analyses.

### 9.2.2 Géomorphologie des cours d'eau

Les formes et caractéristiques physiques d'un cours d'eau naturel sont le résultat d'un état d'équilibre entre les capacités de transport de l'eau et des sédiments et les apports hydrologiques et sédimentaires. La représentation classi-

que de cet équilibre est illustrée à la figure 9.3, qui appuie la définition d'un système fluvial en équilibre (Leopold *et al.*, 1964) :

Un cours d'eau avec son système de plaine de débordement sont en équilibre lorsque les caractéristiques physiques, couplées avec la pente et le débit, permettent d'offrir les vitesses requises pour le transport des sédiments et le stockage des charges sédimentaires générées par le bassin versant.

Les modifications à cet équilibre peuvent être induites par des événements climatiques, hydrologiques ou géologiques; elles peuvent également être le résultat d'une intervention humaine comme la mise en place d'un barrage, la diversion d'une partie des débits, l'extraction minière ou l'urbanisation du bassin versant. La relation illustrée par la figure 9.3 permet d'apprécier de façon qualitative les relations qui existent entre les différents paramètres (Lane, 1955) :

$$Q_s D \sim Q S \quad (9-1)$$

Où  $Q_s$  est le débit sédimentaire,  $D$  est le diamètre moyen des sédiments,  $Q$  est le débit et  $S$  est la pente du cours d'eau. La relation donnée par l'équation 9.1 indique qu'il existe une proportionnalité entre les différents paramètres et qu'on peut s'attendre à un réajustement si un ou l'autre des paramètres est affecté. La relation ne fournit pas cependant d'information directe quant aux caractéristiques physiques des cours d'eau ni relativement aux seuils critiques qui entraîneront ou non des changements.

Un premier paramètre pour l'évaluation des cours d'eau est sa position dans le système hydrographique du bassin versant. Cette position fournit en effet une première indication des caractéristiques générales du cours d'eau, incluant sa pente longitudinale ainsi que les dimensions du canal. Comme le montre la figure 9.4, des cours d'eau d'ordre 1 (cours d'eau sans affluent) sont situés en amont du système hydrographique et sont généralement caractérisés par des pentes plus fortes et des dimensions plus restreintes. Les interventions seront souvent plus efficaces pour le contrôle de l'érosion lorsqu'elles sont faites sur des sous-bassins se drainant dans des cours d'eau d'ordre inférieur (1 ou 2) (Schueler, 1995).

Les autres paramètres à considérer pour l'évaluation d'un cours d'eau comprennent les dimensions du canal (caractéristiques physiques), le pattern en plan (caractéristiques et localisation des méandres) ainsi que d'autres caractéristiques comme la forme du lit, la composition granulométrique du lit et des berges ainsi que les alternances de bassins d'eau calme (fosses) et de tronçons avec un écoulement plus rapide, séparés par des seuils. La présence de fosses, de seuils et de tronçons plus rapides, avec également des secteurs d'érosion locale aux bas des berges, sont des éléments importants pour assurer et maintenir des habitats sains.

Tel que mentionné précédemment, un paramètre fondamental ayant un impact significatif sur les caractéristiques du cours d'eau est le débit de plein bord (*bankfull discharge*). **Ce débit est celui qui transporte la ma-**

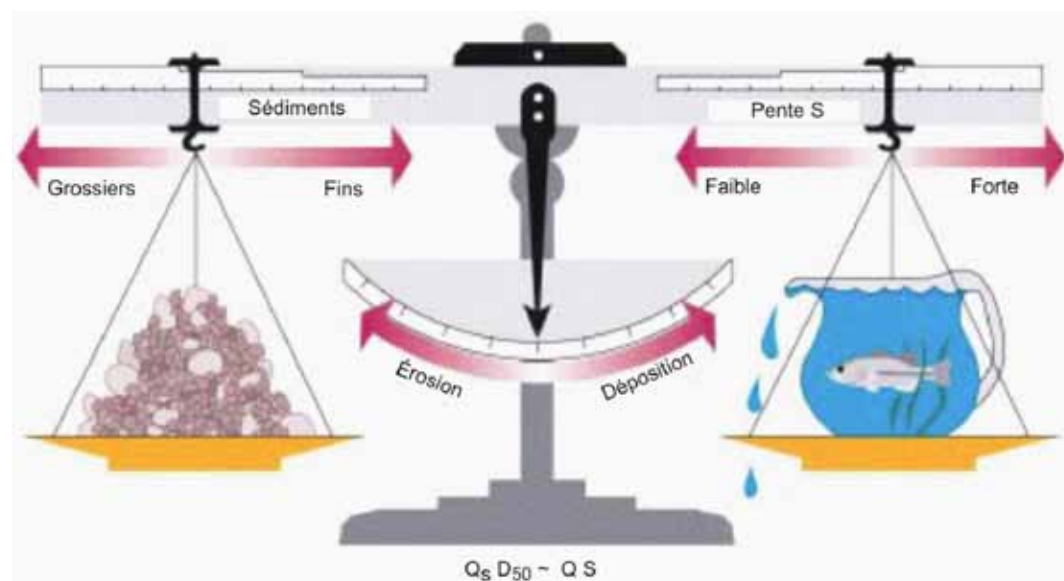
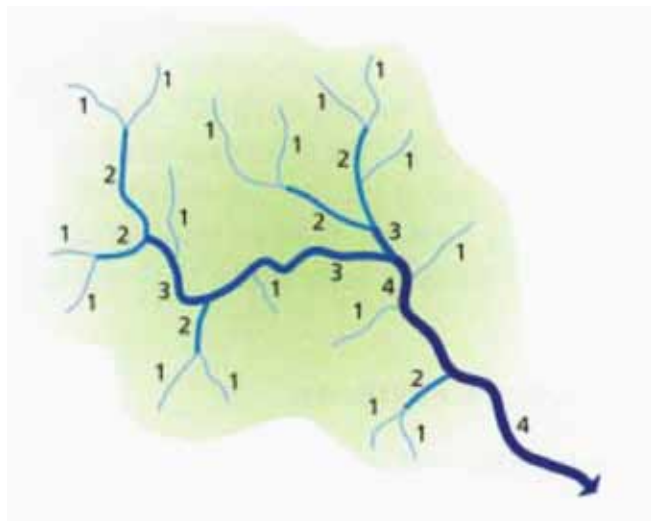


Figure 9.3 Facteurs affectant l'érosion ou la déposition en cours d'eau (Lane, 1955).





**Figure 9.4** Classification des cours d'eau par leur position dans le système hydrographique.

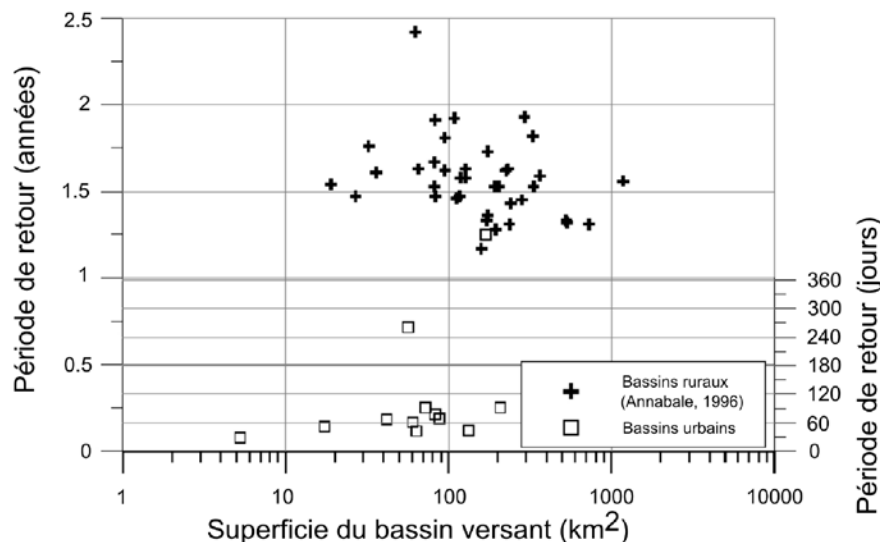
**riorité de la charge sédimentaire et qui contribue donc à l'établissement de la forme et des caractéristiques du cours d'eau.** Les débits plus importants pourront dans certains cas avoir accès à une plaine de débordement plus large.

Historiquement, on a tenté d'établir une relation entre les débits de plein bord et la stabilité des cours d'eau. Puisqu'on estimait que ce débit à pleins bords était représentatif du débit régissant la forme géomorphologique des cours d'eau, on jugeait qu'un critère de contrôle pour l'érosion permettant de maintenir les débits avant et après développement pour cette période de retour serait adéquat. Plusieurs analyses ont donc tenté d'attribuer une

période de retour à ce débit à pleins bords mais il apparaît maintenant, selon les plus récentes recherches entre autres sur des cours d'eau en Ontario (Baker *et al.*, 2008), que cet exercice est au mieux difficile et dans certains cas impossible.

La figure 9.5 montre une comparaison des périodes de retour associées aux débits de plein bord pour des cours d'eau ruraux et des cours d'eau urbains. On constate que, pour des cours d'eau ruraux en conditions naturelles, la période de retour moyenne se situe effectivement autour de 1 dans 1,5 an mais qu'elle peut varier entre 1,25 et 2; toutefois, pour des cours d'eau urbains, la période de retour est plus fréquente et on observe que le débit de plein bord se produit plus d'une fois par année. On reconnaît maintenant que le canal principal n'est pas formé par un seul événement mais que la forme qu'il développe est plutôt le résultat de la somme des forces qui sont exercées sur le lit et les berges pour une gamme de débits, à partir de la moitié du débit de plein bord jusqu'au débit de plein bord (MEO, 2003). De plus, on reconnaît également que le potentiel d'érosion est étroitement lié à la résistance des matériaux en place. Les approches plus détaillées, comme celle décrite brièvement à la section 9.6, tiennent compte de ces aspects.

Un autre débit caractéristique, en plus du débit de plein bord, devrait également être considéré (Baker *et al.*, 2008). Il s'agit du débit associé aux besoins des différents habitats et qui sont critiques pour maintenir l'intégrité écologique des cours d'eau. Une conception des canaux



**Figure 9.5** Comparaison des périodes de retour pour les débits de plein bord dans le sud de l'Ontario, en distinguant les bassins ruraux des bassins urbains (adapté de Baker *et al.*, 2008).

basée sur les débits contrôlant les aspects géomorphologiques et les débits écologiques peut permettre de maintenir la stabilité des canaux pour les habitats.

Les canaux ont une certaine capacité à tolérer les variations de débits et d'apport de sédiments qui accompagne l'urbanisation. Ce degré de tolérance varie en fonction du type de matériaux qu'on retrouve dans le lit du cours d'eau et sur les berges, ainsi que du type, de la densité et de la distribution de la végétation. Certaines études ont permis d'établir que les cours d'eau pouvaient devenir instables et commencer à s'éroder lorsque le pourcentage d'imperméabilité dépassait 10 %. Les modifications suivent généralement un processus en trois étapes (MEO, 2003) :

1. Le thalweg (la partie la plus profonde de la section du cours d'eau) s'ajuste et les formes du lit se modifient. Ce stade, qui peut passer inaperçu, peut durer de 2 à 3 ans et peut tout de même avoir un impact sur les habitats.
2. Durant le second stade, le canal commencera à s'élargir plus rapidement. De 35 à 65 ans pourront s'écouler avant que le canal ne se réajuste au nouveau régime de sédiments et de débits.
3. Le stade final implique le redéveloppement de la forme du méandre (donc modification en plan du cours d'eau). Cet ajustement se fait toutefois moins rapidement que le deuxième stade et le taux de changement est donc moins dramatique.

Annable (1996) a complété une étude sur plusieurs cours d'eau en Ontario, ce qui a permis de caractériser plusieurs paramètres en fonction notamment du type de cours d'eau établi avec la classification de Rosgen (1994), qui est décrite à la section suivante.

### 9.2.3 Classification des cours d'eau

Les modifications aux cours d'eau que l'urbanisation entraînera pourront être variables en fonction des types de cours d'eau et il devient donc important de pouvoir les caractériser et les classer adéquatement. Un système de classification détaillé a été développé par Rosgen (1994, 1996) et peut fournir un cadre d'analyse très utile. Ce système, montré schématiquement aux figures 9.6a et 9.6b, classe les cours d'eau selon leur degré d'encaissement, le rapport largeur/profondeur, la sinuosité, la pente ainsi que les matériaux qu'on retrouve dans le canal principal.

Le premier paramètre utilisé pour identifier les classes de cours d'eau est la pente. Le tableau 9.1 donne l'établissement des classes selon ce paramètre. Un deuxième paramètre est la sinuosité, qui est définie comme étant le rapport de la longueur du canal le long de sa ligne de centre à la longueur de la vallée mesurée le long du centre des méandres ou de la vallée. La sinuosité produit de la résistance à l'écoulement et altère la pente effective du canal. Le tableau 9.2 définit les catégories selon ce paramètre.

Un autre paramètre pour classer les cours d'eau est le rapport largeur/profondeur (la largeur étant mesurée au débit de plein bord et la profondeur étant la profondeur moyenne de la section pour ce même débit). Ce ratio dépend en grande partie de la résistance des matériaux en place, de leur capacité de maintenir une pente et de résister à l'érosion. Des matériaux cohésifs vont par exemple produire des canaux plus étroits et profonds. Le tableau 9.3 donne les classes par rapport à ce paramètre.

**Tableau 9.1**

Classes de cours d'eau en fonction de la pente (Rosgen, 1996).

Type de cours d'eau	Pente
A	0,04 – 0,099
B	0,02 – 0,039
C	< 0,02
D	< 0,02
Da	< 0,005
E	< 0,02
F	< 0,02
G	0,02 – 0,039

**Tableau 9.2**

Classes de cours d'eau en fonction de la sinuosité (Rosgen, 1996).

Type de cours d'eau	Rapport de sinuosité
Aa	1,0 – 1,1
A	1,0 – 1,2
B	> 1,2
C	< 1,4
D	Canaux multiples
Da	Canaux multiples
E	> 1,5
F	> 1,4
G	> 1,2

Les dimensions des matériaux en place sur le lit et les berges sont le quatrième paramètre pour la classification (voir figure 9.6), avec comme indice la dimension médiane ( $D_{50}$ ). Ce facteur est aussi associé à la résistance du canal à l'érosion et a également une influence sur la résistance à l'écoulement. Un autre facteur de classement est le ratio de confinement (entrenchment ratio), qui est défini comme le ratio de la largeur de la plaine de débordement à la largeur à pleins bords du canal. La largeur pour la plaine de débordement est définie comme étant la largeur correspondant à deux fois la profondeur d'eau maximale du canal. Le tableau 9.4 donne les types en fonction de ce paramètre.

Finalement, un sixième paramètre pour la classification de Rosgen est une mesure du relief dans le bassin versant : pentes générales, géologie de surface et forme générale du paysage. Ce paramètre est un indicateur pour la stabilité des pentes et la production de sédiments dans

le bassin versant. Le tableau 9.5 donne les classes relativement à ce paramètre.

Les analyses d'Annable (1996) pour des cours d'eau en Ontario sont basées sur la classification de Rosgen et plusieurs paramètres ont pu être définis en fonction des types de cours d'eau. Ainsi, les points montrés à la figure 9.5 pour les débits de plein bord peuvent être séparés par type de cours d'eau, en distinguant la période de retour du débit de plein bord en fonction du type de cours d'eau (tableau 9.6).

### 9.3 ÉVALUATION DE L'ÉTAT DES COURS D'EAU ET TECHNIQUES DE RÉHABILITATION

L'évaluation géomorphologique et de l'état d'un cours d'eau nécessite des connaissances dans plusieurs domaines. Il va sans dire que cette section ne présentera qu'un survol des différentes approches disponibles et qu'on aura intérêt au besoin à consulter différentes références pour

**Tableau 9.3**

Classes de cours d'eau en fonction du ratio largeur/profondeur (Rosgen, 1996).

Type de cours d'eau	Rapport largeur/profondeur
Aa	< 12,0
A	< 12,0
B	> 12,0
C	< 12,0
D	> 40,0
Da	< 40,0
E	< 12,0
F	< 12,0
G	< 12,0

**Tableau 9.4**

Classes de cours d'eau en fonction du ratio de confinement (Rosgen, 1996).

Type de cours d'eau	Rapport de confinement
A	< 1,4
B	1,4 – 2,2
C	> 2,2
D	n/a
E	> 2,2
F	< 1,4

**Tableau 9.5**

Classes de cours d'eau en fonction du ratio de confinement (Rosgen, 1996).

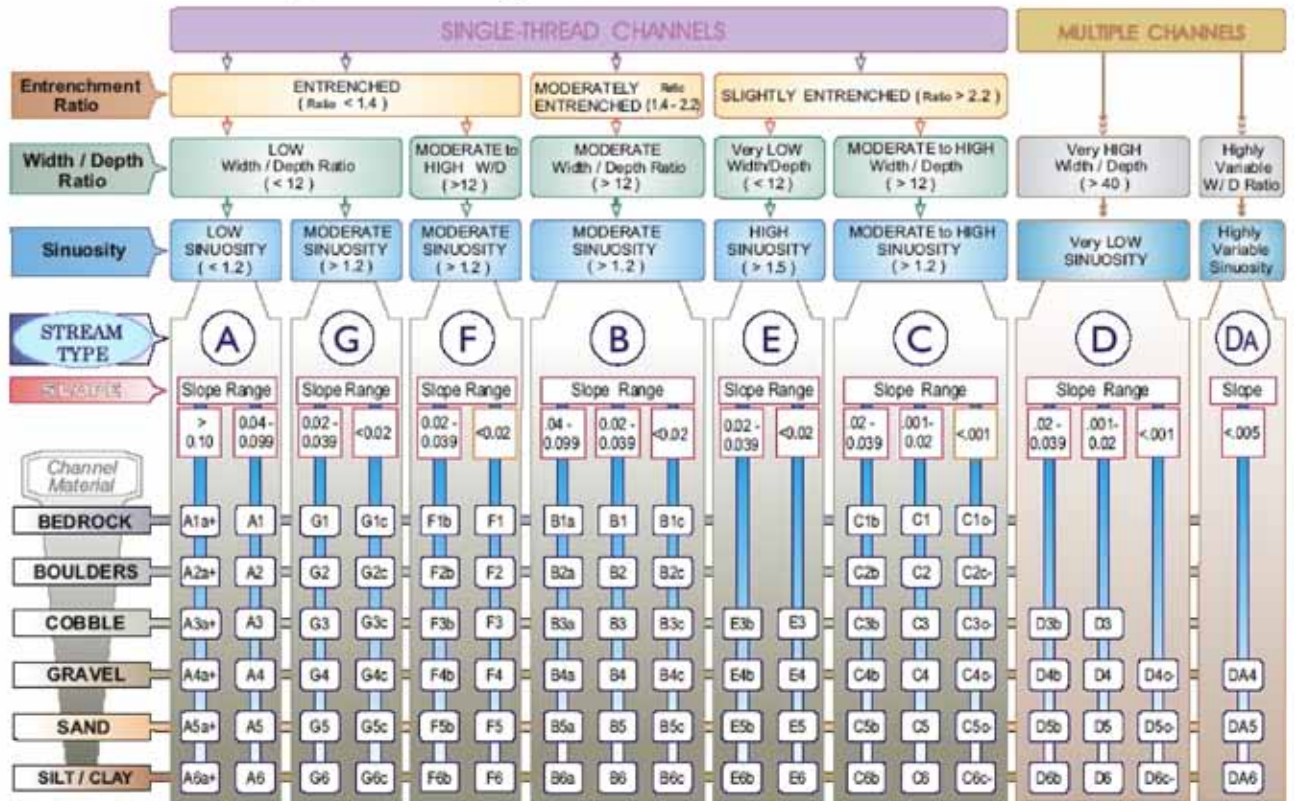
Type	Description
A	Pentes fortes, relief accidenté, stabilité des pentes diminuant de la classe 1 à 5 avec la diminution de la dimension des sédiments
B	Pentes modérées, relief modérément accidenté, stabilité des pentes diminuant de la classe 1 à 5 avec la diminution de la dimension des sédiments
C	Vallées larges, sols alluviaux

**Tableau 9.6**

Périodes de retour pour les débits de plein bord pour des rivières de secteurs ruraux en Ontario (Annable, 1996).

Type de cours d'eau (système Rosgen)	Période de retour	Écart-type	Période de retour Min.	Période de retour Max.
B	1,6	0,2	1,4	1,9
C	1,6	0,3	1,2	2,4
E	1,7	0,1	1,5	1,9
F	1,5	0,1	1,3	1,6
Tous	1,6	0,2	1,2	2,4

## The Key to the Rosgen Classification of Natural Rivers



KEY to the ROSGEN CLASSIFICATION of NATURAL RIVERS. As a function of the "continuum of physical variables" within stream reaches, values of **Entrenchment** and **Sinuosity** ratios can vary by +/- 0.2 units; while values for **Width / Depth** ratios can vary by +/- 2.0 units.

Figure 9.6a Système de classification des cours d'eau de Rosgen (1994).

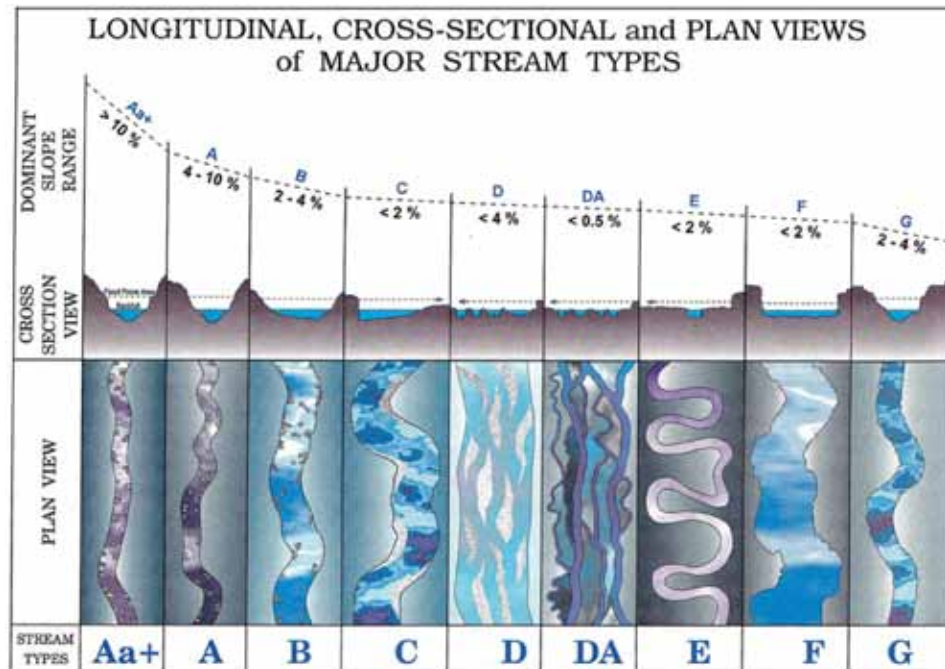


Figure 9.6b Système de classification des cours d'eau de Rosgen (1994).



approfondir ces aspects. Le choix des techniques appropriées pour la réhabilitation d'un cours d'eau dégradé physiquement est nécessairement lié à une évaluation adéquate des systèmes et il est donc important que cette évaluation soit réalisée avec un niveau de détails suffisant. Des références de base pour l'évaluation géomorphologique des cours d'eau et les techniques de réhabilitation incluent Rosgen (1994, 1996), Schumm *et al.*, (1984), FISRWG (2001), GGHA, (2006) et CWP (2004).

Le principal effet visible de l'urbanisation sur les cours d'eau est un élargissement du canal et de la section d'écoulement. Cet élargissement peut se faire graduellement en fonction du développement ou de façon plus abrupte en réponse à des événements plus intenses (Shaver *et al.*, 2007). Même si le cours d'eau a été stable depuis plusieurs années, un seul événement très important peut provoquer des changements dans les dimensions du canal et amorcer un processus d'érosion. En plus d'entraîner une accélération de l'élargissement du cours d'eau, la fréquence accrue et l'ampleur modifiée des débits de plein bord causent aussi de l'érosion des berges, une dégradation de la plaine de débordement et une perte dans certains cas de la sinuosité du canal. Les changements géomorphologiques et leur ampleur dépendent toutefois de plusieurs facteurs, dont la géologie, la structure et le type de végétation et les types de sol. Les documents mentionnés plus haut pourront être consultés pour les différentes approches permettant de caractériser et d'évaluer les phénomènes d'érosion.

Plusieurs techniques sont par ailleurs disponibles pour stabiliser localement les berges et assurer une protection spécifique. La meilleure approche reste toujours la prévention mais, dans plusieurs cas, en plus d'intervenir dans le bassin versant avec des mesures pour la gestion des eaux pluviales, il y aura lieu de mettre en place en même temps certains ouvrages de stabilisation lorsque la dégradation est assez avancée. La sélection de ces techniques de stabilisation devrait se faire en considérant trois facteurs (Biedenharn *et al.*, (1997) :

- L'efficacité des approches alternatives;
- Les considérations environnementales;
- Les facteurs économiques.

L'efficacité dépend entre autres de la durabilité, de la capacité d'ajustement à l'érosion, des profondeurs d'eau, des limitations quant aux interventions en berge, de l'ali-

gnement du canal, de l'impact sur les lignes d'écoulement et des impacts indirects sur l'érosion en amont et en aval du site. Les considérations environnementales devraient prendre en compte les objectifs généraux suivants :

- Préserver ou améliorer les habitats aquatiques et terrestres;
- Éviter d'intervenir lors des périodes sensibles pour les différentes espèces;
- Préserver ou améliorer les opportunités d'usages récréationnels;
- Préserver l'esthétique naturelle;
- Préserver les ressources s'il y a lieu.

Les facteurs économiques incluent le coût des différentes techniques, la disponibilité des matériaux et des ressources pour leur mise en œuvre et la faisabilité d'une construction par phases.

La protection contre l'érosion doit se faire en tenant compte de différents facteurs (Biedenharn *et al.*, (1997) :

- Géomorphologie appliquée;
- Hydraulique;
- Protection de la base des berges;
- Drainage de surface;
- Recommandations du manufacturier;
- Facteur de sécurité.

Lorsque la matière première est disponible en quantité et avec des caractéristiques adéquates, la protection en enrochement est souvent celle qui est la moins coûteuse tout en étant relativement flexible pour s'adapter à du mouvement ou du tassement (NHI, 1990). Les facteurs importants à considérer pour la protection en enrochement sont :

- La durabilité de la roche;
- La densité de la roche;
- La vitesse d'écoulement près de l'enrochement;
- L'angle du lit du cours d'eau et des berges;
- L'angle de repos de l'enrochement;
- La forme et l'angularité des roches pour assurer la stabilité;
- L'épaisseur de la couche de protection;
- La nécessité d'avoir un filtre ou une membrane géotextile ;
- La transition entre la couche de protection et les portions non protégées de la berge en amont et en aval.

Les documents et normes du MTQ fournissent des indications et recommandations pour les protections en enrochement et d'autres références pourront également être consultées à ce sujet (TRCA, 2001; NCHRP, 2006).

La protection en enrochement n'est cependant pas la plus esthétique des approches et il existe plusieurs autres techniques faisant notamment appel à de la végétation, des matelas de protection, des gabions ou d'autres matériaux. La présentation détaillée de ces différentes techniques dépasse toutefois le cadre du présent document.

#### 9.4 PRINCIPES D'UNE STRATÉGIE DE CONTRÔLE

Les contrôles pour minimiser l'érosion doivent permettre de compenser le fait que les débits et volumes de ruissellement seront non seulement augmentés avec l'urbanisation mais aussi que les débits de plein bord ou de la moitié du débit de plein bord se produiront plus souvent, soumettant ainsi le lit et les berges à des sollicitations plus intenses et fréquentes.

Dans l'élaboration d'une stratégie globale de contrôle pour l'érosion, on peut définir différents objectifs qui devraient normalement être envisagés de façon hiérarchique (DNR, Ohio, 2006) :

1. **Assurer et maintenir la stabilité verticale du canal principal.** L'instabilité peut se révéler par une érosion (voir figure 9.7) ou par des zones de dépôts de sédiments, mettant en évidence la perte d'un équilibre dynamique entre la capacité de transport des sédiments et leur apport.

Plusieurs types d'approches existent pour évaluer la stabilité verticale, incluant une modélisation sophistiquée du transport de sédiments, une analyse



Figure 9.7 Illustration d'un processus d'érosion verticale.

avec les seuils critiques d'entraînement pour les matériaux du lit (avec par exemple un logiciel comme HEC-RAS), le ratio de la hauteur des berges à la profondeur correspondant au débit de plein bord ou encore la simple observation visuelle (figure 9.7). Les solutions dans ce cas peuvent inclure la mise en place de mécanismes de contrôle pour la gestion des eaux pluviales à l'échelle du bassin versant, combinée dans certains cas à des interventions plus localisées (Rosen, 1996).

2. **Accès à une plaine de débordement pour les débits de crue** (figure 9.8). Si le cours d'eau a accès à une plaine lors de débits importants, la force d'érosion dans le canal principal sera ainsi diminuée, les vitesses dans la plaine seront réduites et les eaux débordées pourront s'infiltrer suite à la crue et venir alimenter la nappe phréatique. En présence d'érosion et d'une augmentation des profondeurs, les cours d'eau peuvent se voir



Figure 9.8 Accès à une plaine de débordement (confinement ou non).

couper cet accès aux plaines de débordement, perdant ainsi les bénéfices associés à ce phénomène naturel. Il se produit alors un phénomène de confinement qui peut dans certains cas accélérer les processus de dégradation puisque dans ce cas toute l'énergie érosive et le transport des sédiments sont contenus dans le canal.

La qualité d'une plaine de débordement est avant tout une question d'élévation par rapport au canal et de son accessibilité; un autre élément important à considérer est son ampleur. Idéalement, l'élévation de la plaine devrait être à peu près au niveau correspondant au débit de plein bord, de façon à ce que le cours d'eau puisse déborder du canal principal une ou plusieurs fois par année. Quant à la largeur de la plaine, elle devrait être au minimum égale à trois fois la largeur correspondant au débit de plein bord et, idéalement, se rapprocher de 10 fois cette largeur (DNR, Ohio, 2006).

3. **Maintien de la forme du canal principal, représentée par les caractéristiques de la section, le patron de méandre et le profil du thalweg.** Les équations empiriques associées à la théorie du régime ou la classification de Rosgen (1996) qui donne des valeurs typiques pour des canaux stables peuvent être utilisées. Un tronçon de référence près du tronçon à réhabiliter ou à protéger peut également être utilisé. Les graphiques reproduits à la figure 9.9 montrent par ailleurs des courbes types obtenues pour différents cours d'eau en Ontario (Annable, 1996), en suivant la classification de Rosgen. Les relations entre les débits de plein bord, les superficies de bassin versant et d'autres caractéristiques obtenues par régression sont données au tableau 9.7. Ces relations, qui représentent des caractéristiques moyennes de cours d'eau naturels, devraient donc représenter des objectifs à atteindre pour des cours d'eau qui sont affectés par le développement urbain. D'autres courbes similaires sont également données par Dunne et Leopold (1978).

Annable (1996) a également établi que, pour des cours d'eau de type C (classification Rosgen), les relations pour les largeurs de plein bord et les profondeurs moyennes avec le débit de plein bord (Q) pour des cours d'eau naturels étaient définies comme suit :

$$\text{Largeur} = 9,70 Q^{0,15} \quad (9-2)$$

$$\text{Profondeur} = 90,33 Q^{0,47} \quad (9-3)$$

**Tableau 9.7**

Relations entre la superficie du bassin de drainage (S) et le débit de plein bord ( $Q_p$ ) pour des cours d'eau naturels en Ontario (Annable, 1996) (le type de cours d'eau correspond à la classification Rosgen (1996)).

Type de cours d'eau (classification Rosgen)	$Q_p = \alpha S^\beta$		
			Écart-type
B	0,47	0,68	0,09
C	0,22	0,90	0,19
E	0,58	0,72	0,23
F	15,37	0,14	0,58
Tous	0,52	0,74	0,25

4. **Maintien et développement des habitats**, dont la qualité est évidemment tributaire des trois autres objectifs préalables.

Il est par ailleurs important de savoir que le concept d'effectuer un contrôle pour le débit de période de retour de 2 ans a été largement utilisé dans les années 1970 aux États-Unis et en Ontario, sans que la protection contre l'érosion soit assurée. Dans plusieurs cas, le contrôle des débits 2 ans après développement à des niveaux 2 ans avant développement a en fait aggravé l'érosion à cause de la durée et de la fréquence accentuées du débit 2 ans. C'est pourquoi l'approche détaillée, décrite brièvement à la section 9.6, a été développée à partir d'analyses sur des cours d'eau en Ontario (MEO, 2003). La section suivante présente toutefois deux approches simplifiées, s'inspirant du guide du ministère de l'Environnement de l'Ontario (2003) et du guide pour le Maryland (MDE, 2000).

## 9.5 APPROCHES SIMPLIFIÉES

### MEO (2003)

Une méthode simplifiée peut être adoptée pour des bassins dont la surface de développement est généralement moindre que 20 ha *ET* lorsque l'une ou l'autre des deux conditions suivantes s'applique (MEO, 2003) :

- A) le bassin tributaire du cours d'eau récepteur au point d'entrée des eaux provenant du secteur en développement est égal ou plus petit que 2500 ha (25 km<sup>2</sup>) *OU*
- B)

- la profondeur pour le débit de plein bord est moindre que 0,75 m;
- le cours d'eau est un cours d'ordre i;
- le canal principal est stable ou en transition;
- le canal est légèrement encaissé;

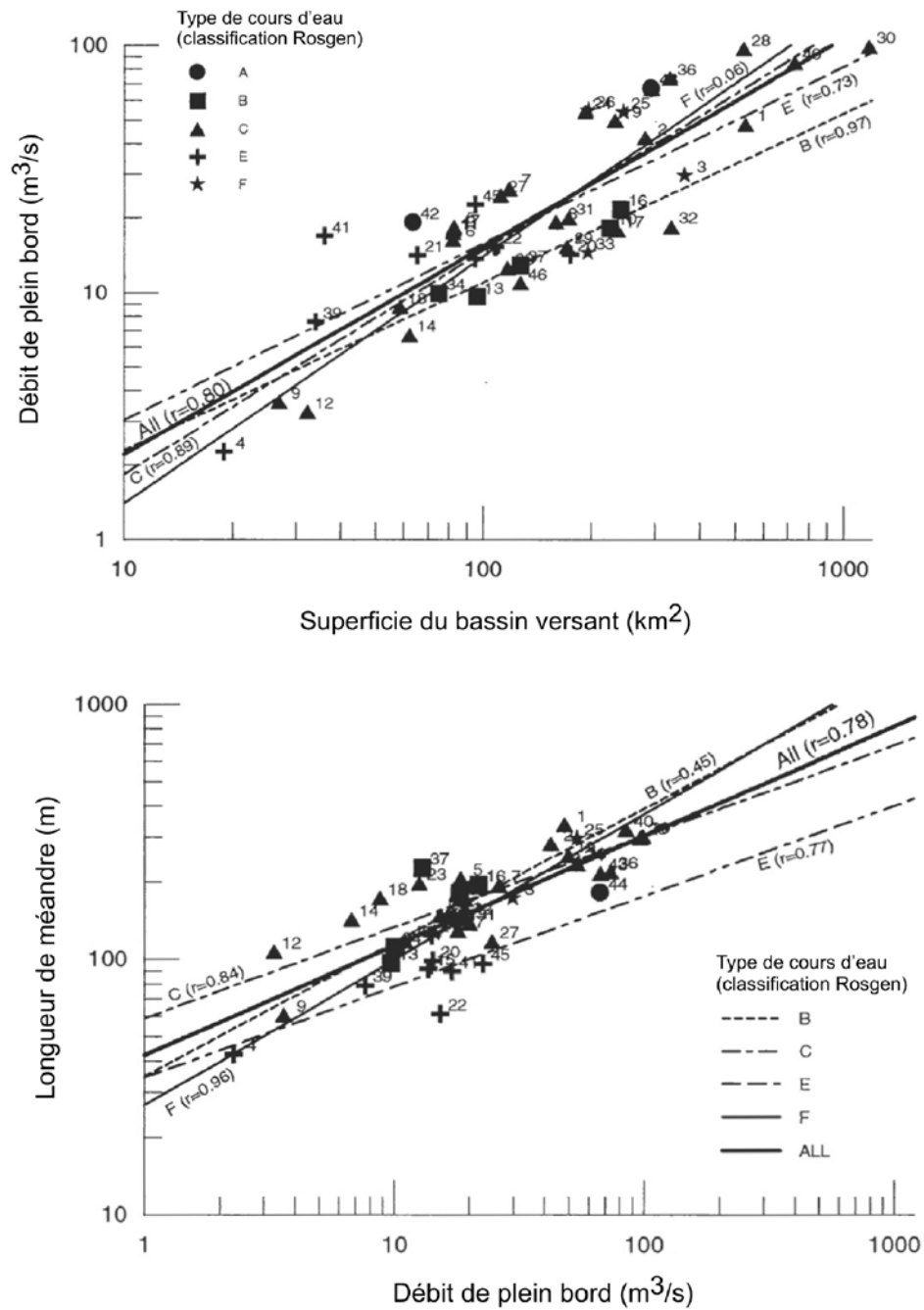


Figure 9.9 Relations spécifiques de paramètres pour des cours d'eau en Ontario (adapté de Annable, 1996).



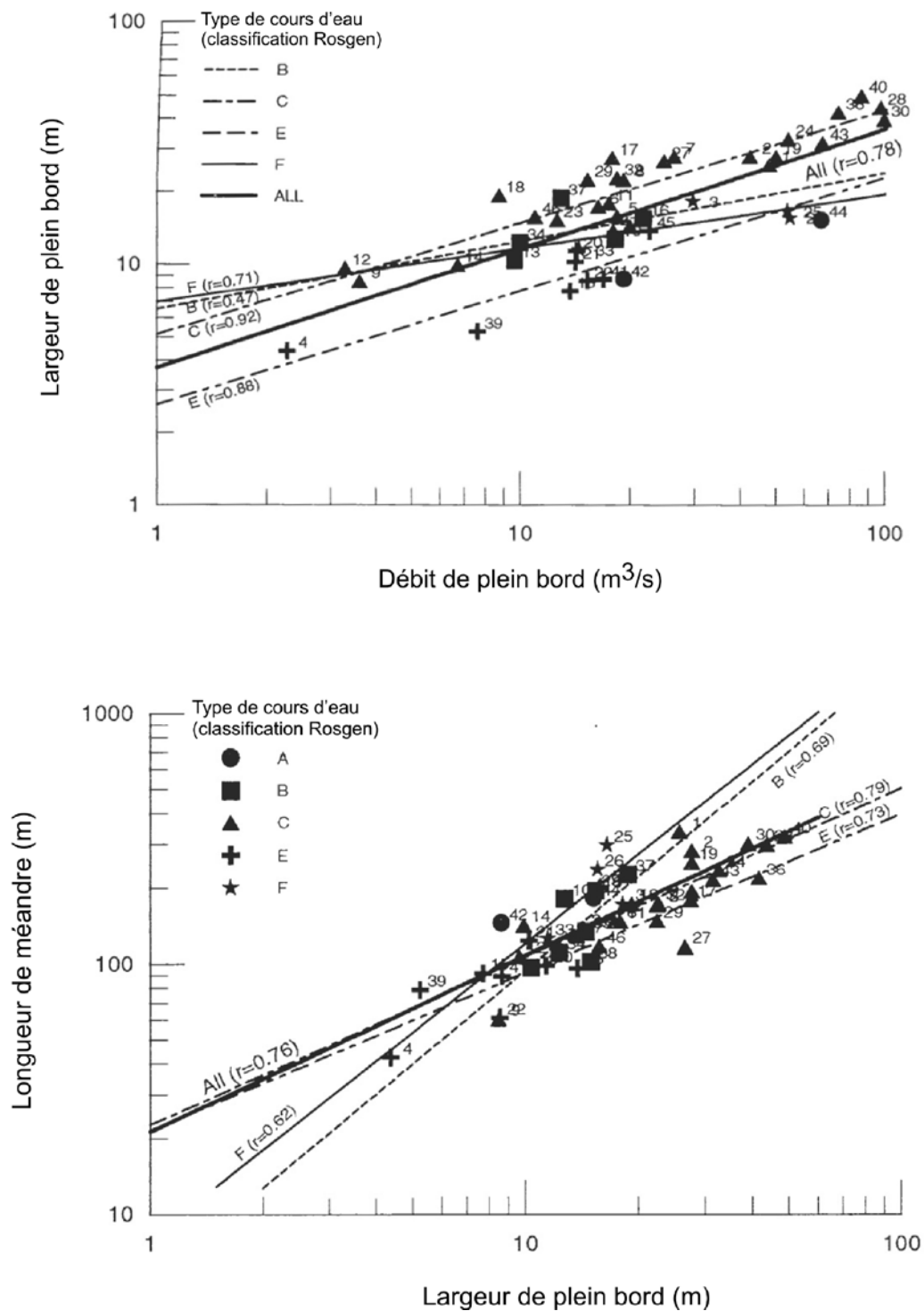


Figure 9.9 (suite) Relations spécifiques de paramètres pour des cours d'eau en Ontario (adapté de Annable, 1996).

**Tableau 9.8**  
Éléments à considérer pour l'approche simplifiée (MEO, 2003).

Paramètre	Critère	Commentaire/définition
Plan directeur pour le bassin ou sous-bassin	N/A	N'existe pas (si une planification existe au niveau du bassin, elle sera évidemment utilisée en priorité)
Dimension du développement	< ou = 20 ha	Cette limite couplée avec la superficie totale de 2500 ha pour le bassin du cours d'eau récepteur permet d'assurer que les impacts seront limités
Cours d'eau de tête	Premier	Le cours d'eau est un canal de premier ordre selon la classification de Horton en utilisant les cartes topographiques 1 :50 000
Index de stabilité	SI < ou = 0,4	Le canal est classé comme stable ou en transition selon l'index calculé par l'évaluation géomorphologique rapide
Ratio d'encaissement	T > ou = 2,2	Le canal est légèrement encaissé selon le système de Rosgen (1996)
Profondeur d'eau de débit de plein bord	< ou = 0,75 m	Pour des profondeurs plus grandes que 0,75 m, les caractéristiques des sols en place (cohésion, dimensions des particules et compaction, stratification, etc.) et la présence de végétation dont les racines assurent une stabilité sont des facteurs contrôlants.
Végétation riveraine	Dense	La végétation est dense et couvre à toutes fins pratiques toute la surface des rives avec une profondeur de racines qui pénètre sous les niveaux d'eau pour les conditions d'étiage

Le tableau 9.8 reprend les différents éléments avec des explications concernant les critères retenus (adapté de MEO, 2003).

L'approche simplifiée implique 3 composantes :

1. un relevé géomorphologique du canal pour mesurer les caractéristiques de la forme du cours d'eau;
2. évaluation de l'applicabilité de la méthode simplifiée pour le développement proposé;
3. établissement du volume de contrôle à la source nécessaire pour la rétention avec un ouvrage avant le rejet.

La première composante comprend les éléments suivants :

- une évaluation générale de la stabilité du cours d'eau et des modes d'ajustement;
- un relevé des paramètres suivants permettant de caractériser le cours d'eau :
  - profondeur d'eau de débit de plein bord;
  - largeur au miroir pour le débit de plein bord;
  - largeur de la zone pouvant être inondée à une élévation qui est le double de la profondeur d'eau de débit de plein bord;
  - composition des matériaux pour les rives (dernier tiers inférieur (sur les deux rives) et les matériaux pour le lit;
  - le type de sol selon la classification du NRCS pour le développement à l'étude.

Ces informations permettront de procéder à l'évaluation géomorphologique rapide, en utilisant le formulaire présenté au tableau 9.9. Le tableau est basé sur quatre paramètres :

- Évidence de dépôts;
- Évidence de dégradation;
- Évidence d'élargissement du canal principal;
- Évidence d'ajustement de la forme en plan.

Chacun de ces facteurs est représenté par un certain nombre d'indices (colonne 3 du tableau) et on indique par un oui ou un non si l'indicateur a été ou non observé. Pour chacun des facteurs, la valeur à retenir comme ratio est le nombre de « oui » divisé par le nombre total d'indices. L'indice de stabilité IS est simplement la somme des valeurs obtenues pour chacun des 4 indices divisée par leur nombre (4). Les valeurs obtenues pour l'indice de stabilité peuvent être finalement évaluées à l'aide du tableau 9.10.

Une fois qu'on a établi que la méthode simplifiée est applicable, on doit déterminer le volume de rétention pour le contrôle de l'érosion. Il est important de souligner que les bénéfices pouvant être attribués à des volumes de rétention semblent diminuer si le volume de rétention devient trop important. Cela semble être dû aux facteurs suivants (MEO, 2003) :

1. la perte de volume de stockage effectif associé à des

**Tableau 9.9**

Résumé des indices pour l'évaluation géomorphologique rapide (adapté de MEO, 2003).

Forme/Processus	Indicateur géomorphologique		Présent		Facteur
	No (2)	Description (3)	Non (4)	Oui (5)	Valeur (6)
Évidence d'alluvionnement (ID)	1	Aire de dépôt (bar)			
	2	Matériaux grossiers dans zones rapides			
	3	Dépôt de silt dans zones tranquilles			
	4	Aire de dépôt au milieu			
	5	Accumulation sur les aires de dépôt dans les courbes			
	6	Mauvaise ségrégation longitudinale des matériaux du lit			
	7	Dépôts dans la zone extérieure			
		Somme des indices			
Évidence d'érosion (IE)	1	Fondations de pont exposées			
	2	Conduites exposées			
	3	Émissaire pluvial surélevé			
	4	Gabion/béton minés			
	5	Trou d'érosion en aval des ponceaux/émissaires			
	6	Face coupée pour les aires de dépôt			
	7	Coupe verticale			
	8	Couche de protection avec base dégagée			
	9	Canal dégradé jusqu'au roc			
		Somme des indices			
Évidence d'élargissement (IEL)	1	Arbres, arbustes, clôtures tombés			
	2	Présence de débris organiques de grandes dimensions			
	3	Racines d'arbres exposées			
	4	Érosion au bas du talus dans les méandres			
	5	Érosion au bas de talus sur les 2 côtés dans les zones rapides			
	6	Gabion/murs contournés par l'écoulement			
	7	Longueur de l'érosion au bas de talus > 50 % dans le tronçon			
	8	Longueur exposée d'une conduite ou d'un câble antérieurement enfouis			
	9	Lignes de fracture en haut du talus			
	10	Fondations de bâtiment exposées			
		Somme des indices			
Évidence d'ajustement de la forme en plan (IP)	1	Formation de coupe(s)			
	2	Canal simple à canaux multiples			
	3	Évolution de la forme zone tranquille (bassin) vers zone rapide à un lit abaissé			
	4	Canaux de coupe			
	5	Formation d'îles			
	6	Alignement du thalweg déphasé avec la forme des méandres			
	7	La forme des aires de dépôt mal définie			
		Somme des indices			
Indice de stabilité (IS) = (ID + IE + IEL + IP) / m					

Tableau 9.10

Grille d'interprétation pour l'indice de stabilité (adapté de MEO, 2003).

Valeur de l'indice de stabilité IS	Classification	Interprétation
$IS \leq 0,2$	En équilibre	La morphologie du canal est à l'intérieur de la gamme de variabilité pour des cours d'eau de caractéristiques hydrographiques similaires – l'évidence d'instabilité est isolée ou associée avec des processus normaux
$0,21 \leq IS \leq 0,4$	En transition ou sous stress	La morphologie du canal est à l'intérieur de la gamme de variabilité pour des cours d'eau de caractéristiques hydrographiques similaires mais une évidence d'instabilité est fréquente
$IS > 0,41$	En ajustement	La morphologie du canal n'est pas à l'intérieur de la gamme de variabilité pour des cours d'eau de caractéristiques hydrographiques similaires et une évidence d'instabilité est observée à plusieurs endroits

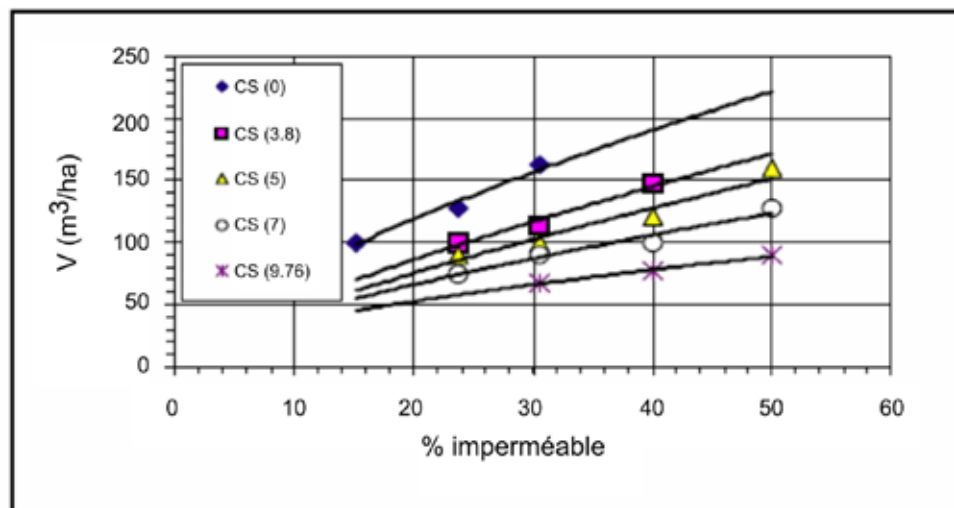
périodes de rétention plus longues, avec l'augmentation du volume du bassin et la tendance pour les événements pluvieux de se présenter comme des événements multiples en succession;

2. l'altération de la réponse hydrologique du bassin versant due à l'effet non uniforme de laminage du bassin sur la distribution de forces tractrices (une diminution des forces d'érosion se produit de façon plus importante à la base des berges que sur le lit du cours d'eau, ce qui force le lit à s'éroder);
3. le confinement des débits associés à des événements plus rares à l'intérieur du canal à cause de l'effet de réduction des volumes de rétention;
4. l'impact sur le régime sédimentaire s'accroît avec des bassins de rétention plus grands et un temps de rétention plus long.

Les figures 9.10 et 9.11 donnent les volumes de stockage pour un pourcentage imperméable (surfaces directement raccordées) et une gamme de valeurs pour le contrôle à la source (CS sur les figures). Par exemple, sur la figure 9.10 on peut constater pour un secteur avec un taux d'imperméabilité de 30 % qu'en contrôlant à la source 3,8 mm sur l'ensemble du bassin, on pourra réduire de 160 m<sup>3</sup>/ha à 120 m<sup>3</sup>/ha les besoins en rétention pour le contrôle de l'érosion.

L'application de ces graphiques nécessite trois étapes :

1. Détermination du pourcentage de surfaces imperméables pour les surfaces directement raccordées;
2. Établissement du type hydrologique de sol (classification du NRCS);
3. Détermination à l'aide des graphiques du volume à prévoir pour la rétention.



**Figure 9.10** Établissement du volume de rétention pour le contrôle de l'érosion pour des sols de type NRCS A et B en fonction du pourcentage imperméable directement raccordé et de différents niveaux de contrôle à la source CS (les chiffres entre parenthèses indiquant les mm stockés pour l'ensemble du bassin versant (méthode simplifiée du MEO, MEO (2003)).



## MARYLAND (2000)

Une autre approche simplifiée qui peut être utilisée est décrite dans le manuel de gestion des eaux pluviales de l'état du Maryland (MDE, 2000). Des analyses de comparaison entre différentes approches de contrôle (Cappucitti, 2000) ont permis d'établir que les résultats obtenus avec cette approche simplifiée étaient similaires à ceux obtenus avec l'approche détaillée du MEO (2003).

On recommande ici **d'effectuer une rétention d'une durée de 24 heures pour l'hydrogramme résultant d'une pluie de 24 heures avec une période de retour de 1 an**. On pourra utiliser une distribution de type II NRCS (anciennement SCS) pour la distribution temporelle de la quantité de pluie. Un modèle hydrologique permettra par la suite de simuler les conditions de pré-développement pour cette pluie, ce qui produira le débit de contrôle. Le volume de rétention à prévoir sera par la suite établi en contrôlant les débits après développement (toujours pour la période de retour de 1 an) à ceux prévalant avant le développement.

La quantité de pluie pour une durée de 24 heures et une période de retour de 1 an peut être prise à 75 % de la quantité pour une période de retour de 2 ans, qui est une valeur directement disponible dans les courbes IDF (Intensité-Durée-Fréquence) fournies par Environnement Canada.

## 9.6 APPROCHE DÉTAILLÉE (MEO, 2003)

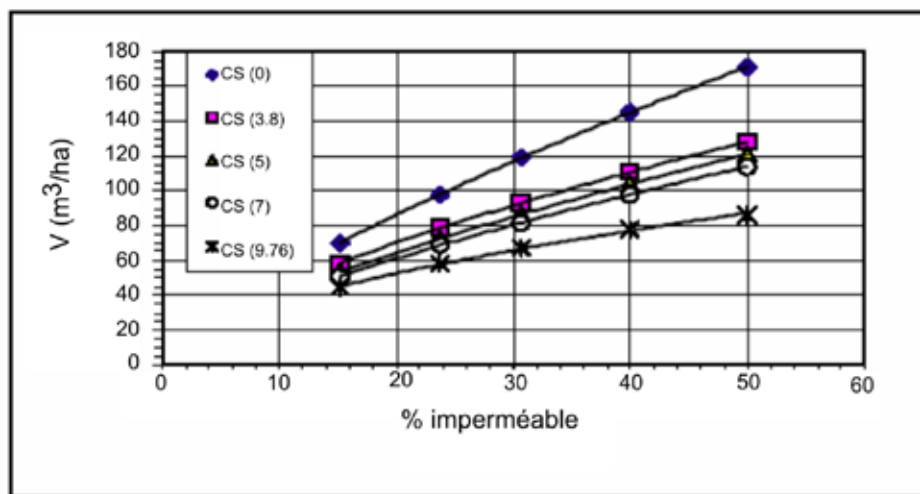
Une approche détaillée est également proposée dans le guide ontarien (MEO, 2003) et peut être utilisée dans les situations suivantes :

- Pour tout développement, sans égard à sa dimension ou sa localisation à l'intérieur du bassin versant, pourvu que les spécialistes techniques soient disponibles pour compléter les évaluations détaillées qui sont nécessaires;
- On considère que cette approche détaillée est plus appropriée qu'une approche simplifiée, à cause des dimensions et de la localisation du secteur et de la sensibilité des cours d'eau récepteurs en terme de morphologie ou d'écosystème pour les habitats.

Le tableau 9.11 résume les principales étapes de cette approche; le document du MEO (2003) peut être consulté pour plus de détails.

Les étapes 1, 2 et 3 représentent les analyses préliminaires du système de cours d'eau afin d'établir l'encadrement pour les investigations subséquentes. Le premier élément force à définir les buts et objectifs à long terme qu'on associe au cours d'eau. Un très petit cours d'eau mal défini et intermittent aura par exemple un traitement différent d'un cours d'eau où l'on retrouve plusieurs espèces de poissons qui bénéficient d'une bonne diversité écologique. La sensibilité du système à un dérèglement du régime hydrologique ou sédimentaire et les conditions morphologiques actuelles du cours d'eau sont également des éléments importants à considérer.

L'étape 4 implique la cueillette des paramètres requis pour compléter les analyses devant être faites en fonction des objectifs visés. Un ou des tronçons de comparaison peuvent ici être sélectionnés et caractérisés pour devenir des étalons afin de comparer les tronçons dégradés.



**Figure 9.11** Établissement du volume de rétention pour le contrôle de l'érosion pour des sols de type NRCS C et D en fonction du pourcentage imperméable directement raccordé et de différents niveaux de contrôle à la source CS (les chiffres entre parenthèses indiquant les mm stockés pour l'ensemble du bassin versant (méthode simplifiée du MEO, MEO (2003)).

**Tableau 9.11**  
Résumé des principales étapes pour l'approche détaillée  
(adapté de MEO, 2003).

Étape	Description
1	Clarification des buts et objectifs
2	Cartographie des ressources et de l'occupation du sol
3	Évaluation du système 1. Physiographique 2. Contexte historique 3. Base de données régionale
4	Évaluation de la stabilité du cours d'eau 1. Définition de tronçon de comparaison 2. Localisation de tronçons représentatifs 3. Évaluation géomorphologique rapide 4. Relevés pour diagnostic
5	Cartographie contrainte-opportunité 1. Options pour réhabilitation - protection 2. Options pour gestion des eaux pluviales
6	Alternatives pour la gestion des eaux pluviales
7	Objectifs de contrôle pour l'érosion 1. Seuils géomorphologiques pour la stabilité 2. Critères géomorphologiques pour la protection – réhabilitation des habitats
8	Critère de conception pour le contrôle de l'érosion 1. Contrôle du volume 2. Contrôle du débit de rejet
9	Sélection du programme optimal (gestion des eaux pluviales avec interventions au cours d'eau)
10	Conception pour la mise en œuvre des pratiques de gestion des eaux pluviales

Les étapes 5 à 9 comprennent le développement, l'évaluation et la sélection de l'alternative optimale pour la gestion des eaux pluviales. Les éléments clés de cette composante sont :

- Identification des contraintes et des possibilités;
- Développement des critères de conception pour la gestion des eaux pluviales;
- Développement des alternatives qui peuvent comprendre une série de mesures et de pratiques;
- Sélection d'une alternative;
- Conception préliminaire des différentes techniques et mesures comprises dans le plan de gestion des eaux pluviales.

Les plans détaillés sont finalement préparés à l'étape 10, dans laquelle on devrait également prévoir un plan de réalisation qui demeurera flexible et pourra être adapté en fonction d'un programme de suivi.

## RÉFÉRENCES

- Alberta Transportation (2003). *Design guidelines for erosion and sediment control for highways*. Alberta Transportation, Edmonton, Alberta.
- Aquafor Beech Ltd (2006). *Stormwater management and water-course impacts : the need for a water balance approach*. Rapport pour TRCA (Toronto Region Conservation Authority), Toronto, On.
- Annable, W. K. (1996). *Database of morphologic characteristics of watercourses in southern Ontario*. Ministère des Ressources naturelles, Ontario.
- Baker, D. W., Pomeroy, C.A., Annable, W.K., MacBroom, J. G., Schwatz, J. S. et Gracie, J. (2008). *Evaluating the Effects of Urbanisation on Stream Flow and Channel Stability – State of Practice*. World Environmental and Water Ressources Congress 2008. Hawaii.
- Calgary (2001). *Guidelines for erosion and sediment control*. Ville de Calgary, Wastewater and drainage urban development, Calgary, Alberta.
- CASQA (California Stormwater Quality Association) (2004). *Stormwater Best Management Practice (BMP) Handbook – Construction*. California Stormwater Quality Association, Menlo Park, CA.
- DNR (Department of Natural Resources), Ohio (2006). *Rainwater and Land Development Ohio's Standards for Stormwater Management Land Development and Urban Stream Protection*. Ohio Department of Natural Resources Division of Soil and Water Conservation, Columbus, Ohio.
- Dunne, T. et Leopold, L.B. (1978). *Water in environmental planning*. W.H. Freeman, New York.
- EPA (2007). *Developing your stormwater pollution prevention plan – A guide for construction sites*. Rapport EPA-833-R-06-004, Washington, D.C.
- Federal Interagency Stream Restoration Working Group (FISRWG) (15 agences fédérales des États-Unis) (1998). *Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices*. GPO Item No. 0120-A; SuDocs No. A 5 7.6/2:EN 3/PT.65 3. ISBN-0-934213-9-3.
- GGHA (Greater Golden Horseshoe Area Conservation Authorities) (2006). *Erosion and sediment control guidelines for urban construction*. GGHA, Toronto, ON.
- Goldman, S.J., Jackson, K. et Bursztynsky, T. A. (1986). *Erosion and sediment control handbook*. McGraw-Hill, New-York.
- Hollis, G.E. (1975). *Effect of urbanization on floods of different recurrence interval*. *Water Resources Research*. 11(3), 431-435.
- Lane, E.W. (1955). *The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering*. *Journal of hydraulics division, ASCE* 81:745-761.
- Maryland Department of the Environment (MDE) (2000). *Maryland Stormwater Design Manual: Volume 1 and 2*. Maryland Department of the Environment, Annapolis, Maryland.
- MEO (2003). *Stormwater Management Planning and Design Manual*. Ministère de l'environnement de l'Ontario, Toronto, On.
- MPCA (Minnesota Pollution Control Agency) (2005). *Minnesota Stormwater Manual*. Minnesota Stormwater Steering Committee, Minnesota.
- MTO (Ministère des transports de l'Ontario) (1997). *Drainage management manual*. Drainage and hydrology section, Transportation engineering branch, Toronto, ON.
- Poff, L. N., Allen, D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, Richter, B., Sparks, R.E. et Stromberg, J. (1997). *The natural flow regime*. *Bioscience* Vol. 47, No. 11.
- Rosgen, D.L. (1994). *A classification of natural rivers*. *Catena*, Vol. 22, 169-199. Elsevier Science, B.V. Amsterdam.
- Rosgen, D.L. (1996). *Applied river morphology*. Wildland hydrology, Pagosa Spring, CO.
- Schueler, T. (1995). *Site Planning for Urban Stream Protection*, Center for Watershed Protection, Elliot City, Maryland.
- Schueler, T. et Brown, K. (2004). *Urban Watershed restoration manual No. 4: Urban stream repair practices*. Version 1.0. Center for Watershed Protection, Elliot City, Maryland.
- Schumm, S. A., Harvey, M. D. et Watson, C.C. (1984). *Incised channels: morphology, dynamics and control*. Water resources publications, Littleton, CO.
- Shaver, E., Horner, R., Skupien, J., May, C. et Ridley, G. (2007). *Fundamental of urban runoff management – Technical and institutional issues*. North American Lake Management Society et EPA, Madison, WI.
- TRB (Transportation Research Board) (1980). *Design of sedimentation basins*. *NCHRP Synthesis of Hwy. Practice No. 70*.
- Wolman, M.G. et Miller, J.P. (1960). *Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes*. *Journal of Geology*. 68(1), 54-74.