

MODÉLISATION

CHAPITRE 10

10.1 INTRODUCTION

10.1.1 Concepts généraux et terminologie

Les modèles sont une représentation simplifiée d'un processus ou d'un système, la plupart du temps sous une forme différente par rapport au système lui-même. Le terme modèle est en ce sens apparenté à la notion de concept qui peut être traduit subséquemment en relations mathématiques. Il est important de souligner que le modèle mathématique peut être aussi simple qu'une seule équation ou en comprendre plusieurs centaines pour décrire de façon plus détaillée certains processus. À titre d'exemple, la méthode rationnelle constitue en elle-même un modèle qui permet d'estimer, avec certaines simplifications et hypothèses, un débit de pointe pour la conception des réseaux. Les modèles élaborés avec certains logiciels de simulation peuvent servir à établir le même paramètre de conception, mais en utilisant une représentation beaucoup plus détaillée que celle sur laquelle se base la méthode rationnelle. Dans certains cas, cela ne veut toutefois pas dire que la réponse obtenue avec un modèle plus complexe soit nécessairement plus précise ou valide que celle obtenue avec la méthode rationnelle.

Les comportements hydrologique et hydraulique d'un sous-bassin urbain soumis à une précipitation peuvent être très complexes et un modèle nous fournit une vue simplifiée permettant de réduire cette complexité et de résoudre des problèmes spécifiques. Un problème est une difficulté qu'il faut résoudre pour obtenir un certain résultat et, en hydrologie urbaine, les problèmes de conception peuvent souvent être ramenés à des questions spécifiques qui servent à définir des objectifs relativement précis, par exemple :

- Quelles sont les dimensions du réseau de drainage pouvant transporter sans surcharge les débits de pointe qu'on peut associer à une période de retour de 1 dans 5 ans ?
- Quelle devrait être la capacité d'un ponceau traversant une autoroute ?
- Quel devrait être le volume utile d'un bassin de rétention devant prévenir les inondations ou les surcharges des réseaux en aval ? Quels contrôles seraient optimaux pour minimiser l'érosion dans le cours d'eau récepteur ? Pour effectuer un contrôle de la qualité et minimiser les impacts pour un rejet dans une rivière ?

Les deux premières questions apparaissent simples à première vue et peuvent généralement être analysées de façon satisfaisante, à tout le moins dans le cas d'un bassin versant de petite taille, avec une approche simplifiée comme la méthode rationnelle. Les questions soulevées dans le troisième point ne peuvent toutefois pas être adéquatement analysées avec la méthode rationnelle et c'est dans ce type de situations, très communes lorsqu'on parle de gestion des eaux pluviales, qu'un modèle plus détaillé deviendra nécessaire.

L'utilisation d'un modèle suppose par ailleurs qu'on soit conscient des relations plus ou moins floues qui peuvent exister entre les problèmes de conception qui doivent être résolus, l'incertitude qui peut être associée au modèle et l'interprétation des résultats obtenus par modélisation. Il existe généralement un degré de complexité optimal pour différents types de problèmes et on peut considérer comme une bonne pratique d'avoir recours au modèle le plus simple possible qui puisse tout de même fournir des

réponses suffisamment précises pour les besoins. Accroître le niveau de détails pour un modèle (et par là même sa complexité et la possibilité de mieux représenter la réalité) a souvent un impact sur l'incertitude qui peut lui être associée et le niveau de connaissances techniques qui sont nécessaires; le tableau 10.1 fournit d'autres avantages et désavantages lorsqu'on compare un modèle simple et un modèle complexe.

En hydrologie urbaine, le système qu'on tente de simuler à l'aide de relations mathématiques est composé du bassin versant et des réseaux de drainage dont les caractéristiques et les interrelations peuvent être relativement complexes. Ce système peut être défini par différentes composantes auxquelles on peut associer différents processus; ces processus peuvent être dans certains cas totalement indépendants de ce qui se passe dans d'autres composantes mais ils sont le plus souvent interreliés. Le tableau 10.2 fournit une liste des principales composantes et des différents processus qui leur sont associés. Le découpage et l'analyse d'un système complexe comme un bassin versant urbain par composantes et processus facilitent le développement d'un modèle.

téristiques et les interrelations peuvent être relativement complexes. Ce système peut être défini par différentes composantes auxquelles on peut associer différents processus; ces processus peuvent être dans certains cas totalement indépendants de ce qui se passe dans d'autres composantes mais ils sont le plus souvent interreliés. Le tableau 10.2 fournit une liste des principales composantes et des différents processus qui leur sont associés. Le découpage et l'analyse d'un système complexe comme un bassin versant urbain par composantes et processus facilitent le développement d'un modèle.

Tableau 10.1

Avantages et désavantages des modèles simples ou complexes (adapté de James, 2003).

Modèle simple	Modèle complexe
Peut être non réaliste	Peut nécessiter des ressources appréciables pour son élaboration
Moins flexible et adaptable à différentes situations	Donne des résultats plus détaillés
Plus facile à comprendre	Plus difficile à comprendre
Utilisable sur n'importe quel ordinateur	Demande un ordinateur plus performant
Moins probable qu'il contienne des erreurs	Plus grande probabilité de contenir des erreurs
Plus facile à vérifier	Plus difficile à vérifier
Demande moins de données d'entrée	Demande plus de données d'entrée
Plus facile à modifier si les objectifs de conception changent avec le temps	Permet d'investiguer les effets de plusieurs facteurs sur le système
Permet d'obtenir rapidement des résultats	Offre plus de flexibilité à l'utilisateur, s'adaptant à différents environnements
Nécessite peu d'habileté technique ou de connaissances approfondies pour l'utilisation	Requiert un modélisateur plus expérimenté et avec des connaissances techniques plus approfondies

Tableau 10.2

Composantes d'un bassin versant urbain et processus typiquement associés (adapté de Welsh, 1989).

Composantes	Processus
Sous-bassin	Transformation de la précipitation en ruissellement Accumulation et lessivage des polluants
Tronçon de canal naturel – plaine inondable	Transport et laminage de débits Érosion et sédimentation
Réseau d'égout	Transport et propagation des débits Surcharge
Rues	Débit en caniveau et interception par les grilles Transport et propagation des débits Accumulation en surface
Bassin de rétention	Laminage des débits Accumulation de sédiments Enlèvement des polluants
Pont / ponceau	Effet de courbe de remous Affouillement Atténuation des débits

Tableau 10.3

Catégories de composantes pour le regroupement de processus pour la simulation de réseaux de drainage.

Catégorie de composantes	Modèles
Sous-bassin	Hydrologique
Tronçon de réseaux	Hydraulique
Ouvrages spéciaux (vannes, ponceaux, orifices, déversoirs)	Modèles spécifiques
Milieu récepteur	Modèle de pollution

Les différentes composantes d'un modèle de simulation de drainage urbain peuvent également être regroupées en 4 principales catégories, comme le montre le tableau 10.3. Chaque composante nécessite l'élaboration d'un modèle particulier pour représenter un ou des processus; différents logiciels pourront avoir des modèles différents pour simuler un même processus et il deviendra donc important, lorsqu'on aura à comparer les résultats obtenus avec différents logiciels, de tenir compte de cet aspect.

En terminant cette section générale, il apparaît important de définir certains termes qui sont parfois utilisés de façon plus ou moins ambiguë en pratique.

Un **système** est un ensemble d'éléments ou de composantes reliés fonctionnellement les uns aux autres. Un **modèle** est une représentation simplifiée soit d'un processus ou d'un système pris dans son ensemble. À titre d'exemple, le modèle de Horton permet de représenter les processus d'infiltration alors que la méthode rationnelle est un modèle permettant d'obtenir le débit de pointe pour un système global (et qui englobe donc de façon simplifiée plusieurs processus, dont ceux liés à l'infiltration).

Un **logiciel** ou un **programme** regroupe par ailleurs un ensemble de lignes de code traduisant en langage informatique les différents processus et relations mathématiques les décrivant; il permet de simuler les différents processus et de prendre en compte leur interaction pour créer un modèle.

Un modèle de drainage urbain peut par ailleurs être schématisé avec les différents éléments montrés à la figure 10.1. Mis à part la pluie (P), on retrouve comme données d'entrée deux catégories d'éléments, soit les données variables et les paramètres. Les données variables (E) sont celles qui changent avec le temps (durant la simulation)



Figure 10.1 Composantes d'un modèle.

et qui peuvent influencer le comportement du modèle (paramètres d'infiltration, dépressions initiales, etc.). Les paramètres (C) sont de façon générale les données qui ne changent pas durant la simulation et qui permettent de décrire le réseau (pente, diamètre, type de conduites) ou certains aspects du bassin versant (par exemple les superficies des sous-bassins ou le pourcentage imperméable).

Le cœur du modèle est évidemment le logiciel qui regroupe les relations mathématiques utilisées pour simuler les différents processus et leur interaction avec différentes procédures de programmation. Une fois réalisée la transformation des données d'entrée par le logiciel, on obtient finalement les résultats (R). Cette simple schématisation permet à la section suivante de définir certains types de modèles.

10.1.2 Types d'utilisation et d'application des modèles

Un premier type de modèle, qui représente une situation où on doit effectuer un calage, est montré à la figure 10.2a. Dans ce cas, pour un bassin versant donné, on mesure la pluie et le débit à l'exutoire et on cherche à ajuster les variables d'entrée pour obtenir, avec les différentes fonctions de transformation dans le logiciel, les résultats correspondant aux mesures de débits.

La figure 10.2b montre un deuxième type de modèle, alors qu'on cherche à connaître le fonctionnement du système pour une entrée connue. Ceci constitue le problème classique de diagnostic du fonctionnement et on peut distinguer dans ce cas les conditions pour l'état actuel ou pour les conditions dans un état soit de pré-développement ou représentant une situation future. C'est évidemment un des avantages importants apportés par la modélisation : avoir la possibilité d'analyser des conditions passées ou futures quant à l'état de certains éléments du système pour pouvoir par exemple établir des critères de contrôle (conditions de pré-développement) ou dimensionner des ouvrages en fonction des conditions qui prévaudront dans un futur plus ou moins lointain. L'analyse rapide de différents scénarios est ainsi facilitée et peut servir de base pour des prises de décision éclairées.

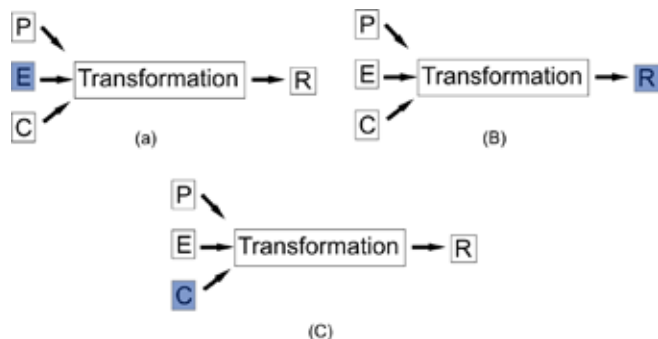


Figure 10.2 Types de modèles. Le type (a) représente un calage, le type (b) un diagnostic et le type (c) un dimensionnement.

Finalement, un troisième type de modèle (figure 10.2c) représente le cas où on désire connaître le dimensionnement à donner aux ouvrages pour obtenir un niveau de service (ou un état de fonctionnement) que l'on s'est fixé pour des variables d'entrée également fixées. Dans cette situation, on doit définir un niveau de risque acceptable, qui dictera par exemple la période de retour de la pluie sélectionnée ainsi que le niveau de service attendu dans les résultats.

Par ailleurs, on peut reconnaître qu'en pratique il existe essentiellement deux types de modélisation : celle effectuée pour un nouveau réseau, pour laquelle il n'existe évidemment pas de données pour caler le modèle et celle pour un réseau existant, où des mesures peuvent être dans ce cas disponibles pour ajuster le modèle aux conditions réelles. Dans la première situation, on doit donc procéder par inférence, c'est-à-dire assumer qu'avec certaines hypothèses concernant les valeurs à utiliser pour les paramètres qu'on ne peut a priori quantifier de façon très précise, le modèle simulera de façon acceptable le système réel projeté. La seule procédure qui peut alors fournir une assistance pour évaluer l'incertitude associée à l'utilisation du modèle est l'analyse de sensibilité, où les paramètres sont variés un à un pour établir leur influence sur les résultats de la modélisation.

Dans le deuxième cas, où on doit analyser le comportement d'un réseau existant, on peut, après avoir effectué une analyse de sensibilité, caler et valider le modèle en confrontant les résultats à des mesures de précipitation et de débits. Ces étapes complétées, on pourra ensuite soumettre le modèle à des conditions critiques et dégager les solutions optimales pour la réhabilitation ou l'opération du réseau.

En ce qui concerne les **types d'application**, on peut distinguer **cinq (5) grandes catégories de problèmes** qui

sont susceptibles d'être résolus en utilisant une modélisation du fonctionnement d'un réseau :

1. établissement du diagnostic de fonctionnement d'un réseau;
2. conception d'un réseau neuf dans une zone située à l'amont du réseau existant;
3. définition des interventions sur un réseau existant;
4. planification et études globales;
5. analyse de la qualité des eaux.

La catégorie 3 est évidemment reliée à la catégorie 1 puisque le diagnostic du réseau servira souvent de base pour définir des interventions, locales ou de plus grande envergure, sur les réseaux existants pour permettre d'atteindre un certain niveau de service. Le diagnostic pour un réseau doit par ailleurs tenir compte de l'état actuel ou de l'état futur tant en ce qui concerne l'occupation du sol que le réseau. Quatre sous-problèmes peuvent donc devoir être analysés :

- Comment fonctionne le réseau existant dans l'état actuel de la ville et des réseaux ?
- Comment fonctionnerait le réseau existant sans modification dans un état futur de la ville ?
- Comment fonctionnerait le réseau après intervention dans l'état actuel de la ville ?
- Comment fonctionnerait le réseau après intervention dans un état futur de la ville ?

La pose d'un diagnostic adéquat nécessite également de porter une attention particulière au choix de la pluie d'analyse. Dans le cas d'un événement réel ayant causé des débordements ou refoulements, on pourra valider le modèle avec les niveaux d'eau observés. Si on veut par ailleurs évaluer le niveau de service du réseau, la sélection de la pluie devra nécessairement se faire en fonction de différents paramètres, dont notamment l'occupation du sol et les dimensions du bassin versant. Idéalement, les évaluations devraient comprendre la modélisation de pluies historiques qui ont entraîné des dysfonctionnements bien documentés des réseaux.

Par ailleurs, les types d'application peuvent également être classés en fonction du type d'ouvrage ou d'objectifs.

Réseau de conduites

Certains logiciels permettent de simuler le problème traditionnel de conception des réseaux, sans considérer de

surcharge ou d'interaction entre les réseaux majeur ou mineur (analyse en double drainage). D'autres logiciels comme SWMM (*Stormwater Management Model*) et ses différents dérivés peuvent servir à analyser les problèmes de surcharge avec des méthodes plus sophistiquées basées sur la résolution des équations de Saint-Venant. Enfin, d'autres logiciels comme OTTHYMO (*OTTawa HYdrologic MOdel*) ou SWMHYMO (*Stormwater Management HYdrologic Model*), DDSWMM (*Dual Drainage Stormwater Management Model*) ou PCSWMM.NET permettent de tenir compte à la fois du réseau mineur et du réseau majeur ainsi que de leur interaction. En règle générale, la simulation de la quantité d'eau ruisselée est relativement bien connue puisque de nombreuses études et validations des principaux logiciels ont permis d'établir leur fiabilité et crédibilité relativement à cet aspect. L'analyse peut se faire pour un nouveau réseau de conduites ou pour une partie de réseau déjà existant. Les approches à privilégier seront évidemment différentes pour chaque cas et les différentes étapes de la modélisation ne seront pas nécessairement les mêmes.

Contrôle quantitatif – Rétention

La plupart des logiciels actuellement disponibles permettent l'analyse hydraulique des ouvrages de rétention des eaux, avec des degrés de sophistication variés. Il importe toutefois de connaître la nature des algorithmes qui sont codifiés dans chaque programme puisque les calculs de volume de rétention effectués par certains peuvent conduire à une mauvaise évaluation des volumes à prévoir pour certaines situations. Les connaissances quant à l'impact qu'a cette rétention sur la qualité des eaux relâchées ne sont toutefois pas très avancées, faute de données et de mesures sur des prototypes déjà construits. Une excellente synthèse de cet aspect est fournie dans Minton (2005).

Contrôle de la qualité de l'eau

La quantification des impacts causés par les rejets d'eaux pluviales vers un milieu récepteur implique la modélisation à la fois de la quantité et de la qualité des eaux ruisselées. Ce dernier aspect est beaucoup moins bien compris actuellement que dans le cas de la quantité d'eau ruisselée et on s'entend généralement pour dire que la prédiction de valeurs absolues des concentrations des paramètres décrivant la qualité de l'eau est à peu près impossible sans données de calage et de vérification valables (Huber,

1985). L'utilisation de modèles pour établir les paramètres de qualité sous différentes conditions sans avoir recours à des mesures permettant le calage doit donc être fondamentalement questionnée : les valeurs obtenues peuvent en fait varier par un ordre de grandeur et indiquer tout au plus l'effet relatif de différentes stratégies de contrôle (ASCE/WEF, 1992).

10.2 LOGICIELS POUR L'ANALYSE DE RÉSEAUX ET LA GESTION DES EAUX PLUVIALES

10.2.1 Généralités – classification de logiciels

Plusieurs types de classification ont été proposés pour les logiciels de simulation couramment employés en hydrologie urbaine. Ils peuvent tout d'abord être classés selon le type d'application auxquels ils sont destinés : la planification des réseaux, la conception ou l'opération. Les logiciels de planification s'en tiennent à une échelle macroscopique et nécessitent une moins grande quantité de données; ils servent essentiellement à évaluer et comparer différentes alternatives, en considérant une échelle plus macroscopique.

Les logiciels destinés à la conception des réseaux sont d'autre part généralement plus sophistiqués et permettent d'analyser le comportement des réseaux à une échelle plus fine. On peut dans ce cas distinguer également si le logiciel permet de simuler ou non les écoulements en charge, ce qui pourra évidemment devenir un critère de choix important si on doit simuler par exemple le comportement d'un réseau existant soumis à une précipitation très importante.

Finalement, on peut utiliser certains logiciels comme outils de contrôle et d'opération des réseaux, de façon à en optimiser le fonctionnement et la capacité. Les avantages que peut procurer un contrôle en temps réel de certains ouvrages dans le réseau peuvent par exemple être examinés avec certains logiciels (ou certains modules de logiciels commerciaux).

On peut également distinguer les logiciels selon leur capacité à simuler en continu (sur une longue période de temps) ou avec seulement un événement pluvieux à la fois. Certains logiciels comme SWMM (*Stormwater Management Model*) peuvent permettre une simulation autant en continu que pour un événement unique alors que d'autres logiciels n'acceptent qu'un événement pluvieux à la fois. Un important avantage de la simulation en continu réside dans le fait qu'on peut alors intégrer les conditions antécédentes d'humidité dans les simulations

et considérer la régénération du potentiel d'infiltration ainsi que l'accumulation de polluants entre les événements pluvieux.

Une autre distinction peut également être faite entre les logiciels qui permettent la simulation de la qualité de l'eau et ceux qui n'offrent pas cette possibilité. Comme on l'a déjà souligné, la modélisation de la qualité des eaux ruisselées est très complexe et on peut difficilement attribuer beaucoup de crédibilité aux résultats s'ils ne sont pas basés sur un calage appuyé par une campagne de mesures. Considérant cette situation, on a développé parallèlement aux modèles élaborés différentes options impliquant des méthodes plus ou moins simples permettant d'obtenir tout de même un ordre de grandeur acceptable pour les paramètres pertinents. On retrouvera dans certaines références une discussion détaillée de ces différentes méthodes (ASCE/WEF, 1992; Schueler, 1987; Shaver *et al.*, 2007), qui ont également été présentées pour certains cas à la section 8. Plusieurs de ces méthodes simplifiées sont basées sur la vaste base de données accumulée au début des années 1980 dans le cadre d'un important programme de caractérisation complété aux États-Unis (*Nationwide Urban Runoff Program* (NURP), EPA, 1983) et qui est maintenant appuyée par des données plus récentes (CWP, 2007; Shaver *et al.*, 2007; Geosyntec, 2008).

10.2.2 Description des logiciels

Les principaux logiciels actuellement utilisés au Québec et au Canada sont en très grande majorité basés sur une approche nord-américaine qui s'est développée essentiellement durant les années 1970 et au début des années 1980, sous le leadership des États-Unis et de certains programmes de recherche en Ontario. Quelques-uns de ces logiciels sont utilisés en Europe mais les pays européens ont plutôt développé parallèlement des outils qui leur sont propres. À titre d'exemple, les logiciels MOUSE ou MikeUrban développés par DHI au Danemark ou InfoWorks (Wallingford, Grande-Bretagne) sont largement répandus en Europe pour la conception et l'analyse des réseaux, mais ils sont relativement moins utilisés en Amérique du Nord. Les logiciels qui seront discutés dans cette section sont ceux qui sont employés de façon courante au Québec et au Canada.

Il est pertinent ici de souligner que, contrairement aux États-Unis où plusieurs organismes gouvernementaux comme la EPA (*Environmental Protection Agency*)

et le NRCS (*National Resources Conservation Service*, anciennement appelé le SCS (*Soil Conservation Service*) du département d'agriculture américain) ont développé des modèles et logiciels et spécifient ceux-ci dans les différentes études et projets qu'ils parrainent, les chercheurs et ingénieurs au Canada ont gardé une attitude critique face aux différents modèles développés aux États-Unis. Des programmes de recherche canadiens comme le IMPSWM (*IMPlimentation of Stormwater Management*) à l'université d'Ottawa dans les années 1980 se sont donc intéressés à la validation des logiciels et ont permis le développement de versions canadiennes améliorant et diversifiant les capacités des logiciels originaux. Deux exemples typiques sont le modèle OTTSWMM (dérivé de SWMM, maintenant commercialisé sous le nom de DDSWMM (*Dual Drainage Stormwater Management Model*) et le modèle OTTHYMO (bonifiant le modèle américain HYMO).

On peut distinguer aujourd'hui deux sources principales à partir desquelles se sont élaborés et développés la plupart des logiciels couramment en usage au Québec pour le drainage urbain. Ces sources sont les logiciels SWMM (*Stormwater Management Model*) et HYMO (*HYdrologic MOdel*) : la plupart des plus récents modèles se sont développés à partir de ces deux sources principales et des algorithmes de calculs qui y sont intégrés. Le logiciel SWMM est maintenant dans sa version 5 et est disponible gratuitement sur le site web de la EPA (*Environmental Protection Agency*). Plusieurs logiciels commerciaux (PCSWMM.NET, XP-SWMM, DDSWMM, InfoSWMM ou StormNet) sont des dérivés de SWMM et ajoutent certaines fonctionnalités additionnelles à celles fournies dans le logiciel de base.

Une autre famille de logiciels regroupe les logiciels développés par le centre HEC (*Hydrologic Engineering Center du Corps of Engineers* de l'armée américaine); les logiciels les plus susceptibles d'être utilisés en hydrologie urbaine sont HEC-HMS (anciennement HEC-1, pour la génération de débits de ruissellement) et HEC-RAS (anciennement HEC-2, pour les calculs de courbes de remous). Certains autres logiciels comme le TR-20 ou TR-55 sont basés uniquement sur les méthodes développées par le SCS (*Soil Conservation Service* des États-Unis); ils sont cependant très peu utilisés au Québec ou au Canada.

Finalement, il existe aussi certains logiciels qui utilisent par exemple la méthode rationnelle pour l'établissement des débits de pointe et qui effectue les simulations

avec des approches hydrauliques simplifiées mais avec une interface graphique sophistiquée. Les logiciels développés par haestad Methods (filiale de Bentley) sont un exemple de ce type d'outil de conception.

Le tableau 10.4 fournit une liste des principaux logiciels, évidemment non exhaustive, avec leurs principales caractéristiques et fonctionnalités. SWMM5 et HEC-HMS (comme HEC-RAS) sont des logiciels développés par des agences fédérales américaines et peuvent être téléchargés gratuitement sur Internet; tous les autres logiciels sont développés par des compagnies privées et leurs coûts varient d'environ 1000 \$ à plus de 10 000 \$ dépendant des fonctionnalités qui sont offertes. Les logiciels européens comme MOUSE (DHI) ou InfoWorks (Wallingford), qui ne sont pas inclus au tableau 10.4, offrent certaines fonctionnalités spécifiques et se caractérisent par une interface graphique et des possibilités d'intégration étendue avec des SIG. Leurs coûts d'acquisition sont cependant

de façon générale beaucoup plus élevés. Les logiciels développés plus spécifiquement pour le marché américain (InfoSWMM, StormNET ou CivilStorm) sont basés sur le module de calculs de SWMM5 mais incluent aussi d'autres méthodes hydrologiques pour la génération des débits qui sont utilisées aux États-Unis (méthodes NRCS et autres méthodes qui sont d'application plus régionale). Par ailleurs, certains logiciels comme DDSWMM ou SWMHYMO n'offrent pas d'interface graphique.

10.2.3 Sélection du logiciel

Compte tenu du nombre appréciable de logiciels qui existent actuellement, le processus de sélection du logiciel le plus approprié pour une application doit s'inscrire dans un contexte plus global où on peut parler de gestion de la modélisation. Chaque logiciel est évidemment de complexité variable et possède des forces et des faiblesses qu'il vaut mieux bien évaluer avant de faire son choix. La so-

Tableau 10.4

Liste comparative des principaux logiciels de simulation pour la gestion des eaux pluviales et l'analyse de réseaux.

Logiciel	Hydrologie			Types d'analyse					
	Bassins ruraux	Bassins urbains	Continu ou événement pluvieux unique	Planification	Rétention	Double drainage	Réseau en charge	Conception des réseaux (écoulement à surface libre)	Simulation de la qualité de l'eau
SWMM5	•	••	Les 2	••	••	•	••	••	••
PCSWMM.NET	•	••	Les 2	••	••	••	••	••	••
XP-SWMM	•	••	Les 2	••	••	•	••	••	••
StormNET	•	••	Les 2	••	••	••	••	••	••
InfoSWMM	•	••	Les 2	••	••	••	••	••	••
DDSWMM		••	Événement unique		•	••		••	
SWMHYMO ou OTTHYMO ou Visual HYMO	••	••	Les 2	••	••	••		••	
HEC-HMS	••	•	Continu	••	••			•	
StormCAD	•	••	Événement unique	••	(PondPack)	•		••	
CivilStorm	•	••	Les 2	••	••	••	••	••	••

• Convient, avec limitation

•• Point fort (convient très bien)

Ne convient pas

lution d'un problème en particulier par une modélisation peut se faire de façon rationnelle en considérant un cadre d'analyse englobant les points suivants :

1. Revue du problème et définition des objectifs. Tous les éléments hydrologiques et hydrauliques pertinents doivent être clairement identifiés et les objectifs bien définis de façon à ce que le ou les logiciels puissent être sélectionnés en fonction de leurs capacités à simuler de façon adéquate les processus concernés.
2. Établissement des critères de performance. En règle générale, on doit utiliser le logiciel le plus simple qui permettra d'obtenir la meilleure solution avec le moins d'effort de modélisation. L'identification précise des critères de performance à atteindre dans la modélisation permettra de déterminer le degré de raffinement approprié et la précision nécessaire.
3. Évaluation des ressources disponibles. L'expertise et l'expérience de la personne en charge de la modélisation sont des facteurs très importants pour assurer l'utilisation judicieuse d'un logiciel. Le temps ainsi que les budgets disponibles pour la réalisation d'un projet doivent également être considérés; il est très commun de rencontrer des projets où l'utilisation d'un logiciel trop sophistiqué pour le problème à l'étude a occasionné des dépassements importants au niveau de l'échéancier ou du budget.
4. Revue des principaux logiciels et de leurs capacités. Finalement, le choix d'un logiciel en particulier s'imposera en confrontant les objectifs de l'étude et les critères de performance à atteindre aux capacités respectives des différents logiciels disponibles. Le logiciel sélectionné devrait idéalement satisfaire les trois critères suggérés par Bedient et Huber (1988) pour attester qu'un logiciel est opérationnel. L'utilisateur d'un logiciel doit tout d'abord avoir accès à un manuel décrivant en détail la théorie, les algorithmes utilisés ainsi que la méthodologie pour entrer les données et interpréter les résultats. Deuxièmement, un support adéquat par téléphone ou correspondance avec une ou des personnes ressources doit être disponible. Finalement, le logiciel devra avoir un historique relativement bien documenté de plusieurs projets complétés par des utilisateurs autres que la personne qui a développé le programme.

Tous les logiciels présentés au tableau 10.4 sont ac-

tuellement bien supportés par les développeurs et les usagers peuvent avoir dans la plupart des cas accès à une bonne documentation et à de l'aide en ligne. Les logiciels commerciaux PCSWMM.NET, InfoSWMM, StormNET et CivilStorm ont tous recours aux modules de calcul de SWMM5 (qui est disponible quant à lui gratuitement sur le site de la EPA (Environmental Protection Agency) des États-Unis). L'apprentissage de SWMM5 et la connaissance de son fonctionnement et des algorithmes de calculs qu'il contient peuvent donc être transférables pour l'utilisation des autres logiciels commerciaux, qui offrent évidemment plus de fonctionnalités et de possibilités pour l'entrée des données et le traitement graphique des résultats.

Pour des projets relativement simples qui nécessitent peu de manipulation de données, de traitement graphique élaboré ou de compatibilité étendue avec des bases de données ou des SIG, l'utilisation de SWMM5 permettra dans la plupart des cas de répondre au besoin puisque la plupart des conditions hydrauliques et de contrôles qu'on peut retrouver dans un réseau peuvent être simulées. Les logiciels DDSWMM et SWMHYMO peuvent par ailleurs permettre d'analyser des réseaux en double drainage (en tenant compte de la capacité d'interception des grilles de rue) mais ils ne disposent pas d'interface graphique, ce qui rend leur utilisation un peu moins conviviale. Une analyse en double drainage est possible avec SWMM5 mais peut se révéler plus laborieuse pour des modèles de plus grande importance. Des fonctionnalités spécifiques pour ce faire sont par ailleurs maintenant disponibles dans les autres logiciels commerciaux basés sur SWMM5, ce qui fait qu'une des raisons d'être de DDSWMM (l'analyse en double drainage) apparaît moins spécifique et unique.

Certains autres logiciels non utilisés directement pour l'analyse des réseaux de drainage urbain pourront par ailleurs être utilisés pour certaines études spécifiques. HEC-RAS (River Analysis System) pourra par exemple être employé pour l'analyse de cours d'eau urbains, de pont ou de ponceau ou HY-8 (développé par la FHWA (*Federal Highway Administration* des États-Unis) pour l'analyse hydraulique des ponceaux.

Il faut par ailleurs considérer que le développement de logiciels pour l'analyse des réseaux de drainage évolue toujours et que certaines fonctionnalités s'ajoutent constamment aux logiciels pour leur permettre de mieux répondre aux besoins des utilisateurs. Ces possibilités rendent toutefois de plus en plus complexe l'utilisation

de ces logiciels et il faut garder à l'esprit que le choix d'un modèle complexe nécessite une formation et des connaissances plus poussées en hydrologie et en hydraulique. Dans plusieurs cas, l'expérience et les connaissances de l'utilisateur seront des facteurs déterminants pour l'utilisation judicieuse et appropriée d'un logiciel et, dans ce contexte, les facteurs importants pour le choix du logiciel seront la possibilité d'avoir de la formation, l'existence de documentation adéquate et également de groupes d'utilisateurs, qui peuvent être une source importante d'information pratique. La communauté d'utilisateurs utilisant le logiciel SWMM5 et tous ses dérivés peut par exemple bénéficier d'un tel groupe de discussion (<http://www.computationalhydraulics.com/Community/Listservers/swmm-users.html>).

L'approche générale pour la sélection d'un logiciel ayant été décrite, on peut maintenant détailler les différentes étapes à compléter dans le cadre d'une modélisation.

10.3 DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE

10.3.1 Données de base

Dans la plupart des cas, des données seront disponibles avant même que l'utilisation d'un modèle soit envisagée puisqu'on aura vraisemblablement identifié et quantifié préliminairement un problème à l'aide de mesures ou d'observations. Par exemple, des échantillons d'eau pourront indiquer un problème de contamination ou des refoulements dans certains sous-sols auront été observés lors de certaines pluies. La compilation de ces données permettra habituellement d'indiquer le type de données ou de mesures additionnelles qui devront être rassemblées. Si l'analyse de ces données initiales indique qu'une modélisation est nécessaire pour résoudre adéquatement le problème à l'étude, les données de base à recueillir avant le début de la modélisation sont habituellement les suivantes :

- Les données météorologiques, qui comprennent normalement un ou des événements pluvieux décrits sous forme de hyétogrammes. La pluie est évidemment un paramètre fondamental pour la modélisation puisqu'elle constitue l'élément moteur engendrant le ruissellement. Pour certaines applications plus spécifiques qui sont plus rares, d'autres données comme le rayonnement solaire, l'évaporation potentielle, la température et le vent peuvent être nécessaires.
- Les caractéristiques du sol pouvant influencer les volumes et débits de ruissellement : la surface, la pente

moyenne du bassin, le type de sol en place, le degré d'imperméabilité, un paramètre pour l'aspect temporel de la réponse hydrologique du bassin, les coefficients de Manning pour les surfaces perméables et imperméables, les taux d'infiltration et les pertes initiales dues aux dépressions de surface.

- Les caractéristiques physiques des différentes composantes des systèmes mineur et majeur : les dimensions des conduites, routes et fossés; les pentes longitudinales et les coefficients de rugosité; les dimensions des ouvrages de contrôle et de régulation. Pour la modélisation de réseaux existants, il vaut toujours mieux relever directement les ouvrages sur le site puisqu'il est fréquent de constater certaines différences importantes entre les plans de construction et ce qui est réellement en place. Cette étape est essentielle pour assurer la validité des simulations.
- Autres données pertinentes, pouvant inclure les mesures de précipitation, de débits et/ou de degré de pollution qui pourront être utilisées pour l'étalonnage et la validation du modèle.

10.3.2 Élaboration du modèle

Cette vérification initiale étant complétée et les données de base ayant été rassemblées, on procède ensuite à l'élaboration du modèle, soit la préparation du fichier informatique proprement dit dans un format compatible avec le logiciel de ruissellement choisi pour l'analyse. Une fois le modèle établi, on doit alors dans un premier temps vérifier que la connectivité entre les conduites et éléments correspond bien à la réalité physique du système modélisé. On devrait également vérifier que la continuité est bien assurée en effectuant manuellement certaines vérifications des résultats fournis par le modèle. Finalement, on peut vérifier globalement les résultats à l'aide d'une méthode simple comme la méthode rationnelle, ce qui permet de faire ressortir des erreurs grossières que les autres étapes n'auraient pas fait ressortir.

Bien que ces différentes étapes soient primordiales, elles sont trop souvent ignorées ou complétées rapidement par l'utilisateur novice qui assumera à tort que les résultats doivent être adéquats dès qu'il les verra apparaître à l'écran ou sur du papier. L'utilisateur doit s'assurer qu'il comprend bien les algorithmes de base du modèle qu'il utilise et qu'il est en mesure de juger de la validité des résultats, en particulier pour des modèles qui fournissent

peu de références dans les fichiers de sortie; de simples vérifications permettront d'éviter des erreurs potentiellement coûteuses et difficiles à corriger plus tard.

10.3.3 Analyse de sensibilité

En des termes très simples, effectuer une analyse de sensibilité consiste essentiellement à vérifier ce qui se passe si on change tel ou tel paramètre et si ce changement est plus ou moins important par rapport aux paramètres qu'on veut analyser. habituellement, les paramètres ne sont pas changés arbitrairement mais plutôt en tenant compte d'une gamme raisonnable pour chaque paramètre. La sensibilité d'un paramètre est présentée en évaluant le changement en pourcentage dans les résultats du modèle par rapport au changement en pourcentage du paramètre en question. L'analyse de sensibilité peut être très utile pour aider à minimiser les critiques qui pourraient être faites sur l'exercice de modélisation, en montrant par exemple que tel paramètre a un impact peu significatif sur les résultats et les recommandations qui en découlent.

En analysant la sensibilité relative de différents paramètres, il faut tenir compte de différents facteurs :

La variation de certains paramètres peut amener une réponse très différente selon qu'on considère différents types de pluie (longue ou courte, intense ou non, etc.). Certains paramètres (comme ceux associés à l'infiltration ou aux pertes initiales) peuvent par exemple être importants pour des pluies de faible envergure sur un bassin avec un pourcentage élevé de zones perméables alors que l'influence de ces mêmes paramètres peut être moins significative pour des pluies très longues et avec une quantité de pluie importante.

La réponse peut parfois être non linéaire, en particulier si on a par exemple des tronçons avec surcharge ou s'il y a des débordements dans le réseau.

En l'absence de données sur lesquelles le modèle puisse être calé, l'analyse de sensibilité constitue souvent la seule approche permettant d'apprécier l'incertitude rattachée à l'utilisation d'un modèle. Compte tenu de la facilité avec laquelle ce genre d'analyse peut être complétée avec certains logiciels, elle devrait être dans la plupart des cas utilisée par les utilisateurs.

Quoiqu'elle soit très utile, l'analyse de sensibilité a cependant certaines limites qui nécessitent dans certains cas le recours à un exercice de calage et de validation. Ainsi, les interactions entre les différents paramètres ne sont

pas évaluées avec une analyse de sensibilité et l'utilisateur dispose de peu d'information sur la nature statistique de l'erreur associée à l'évaluation du paramètre, que seul un calage sur des mesures peut fournir. Par ailleurs, de façon générale, plus le pourcentage de surfaces imperméables augmente pour un bassin en particulier, plus l'incertitude qui peut être associée à la détermination des débits et volumes de ruissellement tend à diminuer. Des mesures de débits pour un stationnement seraient donc moins appropriées que pour des sous-bassins comprenant des parcs ou des zones non développées. De plus, dans le cas d'un réseau pseudo-séparatif où les apports d'eau en temps de pluie sont plus diffus, il peut devenir difficile d'évaluer le degré réel d'incertitude à l'aide uniquement d'un exercice de sensibilité. Pour ces cas, il vaut souvent mieux prévoir des campagnes de mesures qui permettront de caler le modèle et d'évaluer ainsi de façon plus précise le degré d'incertitude qui pourra être attribué aux modélisations.

Une étape préalable au calage consiste évidemment à recueillir les données par l'entremise d'une campagne de mesures de débits ou de polluants dans le cas d'un modèle pour le contrôle de la qualité

10.3.4 Mesures de débit

Les campagnes de mesures de débit sur des réseaux peuvent être coûteuses et leur planification doit se faire de façon à ce que les résultats puissent être adéquatement utilisés pour bien caler le modèle à partir duquel on aura à répondre à certains objectifs de conception.

Avant toutes choses, la période choisie pour la campagne de mesures doit se faire en fonction du type d'événement pluvieux qui prévaudra et du type de réseau analysé. Au printemps, les pluies sont généralement de moins grande intensité mais le volume de ruissellement généré par la fonte des neiges (accompagné ou non par des pluies) est souvent appréciable, créant ainsi des conditions où la nappe phréatique est relativement haute. L'infiltration dans les réseaux est ainsi souvent à son maximum au printemps et une campagne de mesures à cette période sera plus utile si on veut obtenir par exemple de l'information sur un réseau existant pseudo-séparatif ou un réseau dont l'exutoire se trouve dans un cours d'eau dont les niveaux deviennent très hauts au printemps et qui influencent le comportement hydraulique des réseaux.

Normalement, les campagnes de mesures pour l'analyse des réseaux de drainage seront durant la période es-

tivale ou à l'automne. Les précipitations durant l'été, associées le plus souvent à des orages de fin de journée, seront surtout caractérisées par des pluies relativement courtes et intenses qui sont souvent les plus critiques pour le dimensionnement des conduites et des réseaux de transport. Ces types d'événements pluvieux sont par contre plus difficiles à capter en raison de leur disparité spatiale et les débits qu'ils génèrent en réseau peuvent créer des refoulements qui peuvent altérer l'hydrogramme mesuré. Par ailleurs, les précipitations observées à l'automne sont de façon générale de durée plus longue et de plus faibles intensités, pouvant générer des volumes de ruissellement plus importants et une réponse hydrologique plus marquée des bassins à caractère rural ou avec un plus grand pourcentage de surfaces perméables. Ces types de précipitation présentent généralement une meilleure homogénéité spatiale.

En plus des mesures de débits à un ou plusieurs endroits sur le réseau à modéliser, toute campagne de mesures devrait comprendre l'installation d'un ou plusieurs pluviomètres à l'intérieur du bassin versant à l'étude. Considérant la variation spatiale de la précipitation, qui peut être très marquée par exemple pour des cellules orageuses se déplaçant sur le territoire, il est impératif de tenter d'obtenir le plus de précision quant à la précipitation réelle qui est tombée sur le bassin versant. Il peut même devenir impossible de caler le modèle si l'information sur la précipitation n'est pas suffisamment précise ou détaillée. Idéalement, les intervalles de temps pour l'enregistrement des précipitations, tout comme celui des débits d'ailleurs, devraient être de 5 minutes ou, au maximum, de 15 minutes. La précision des mesures de pluie devrait être minimalement de 0,25 mm.

La prise en charge des campagnes de mesures sera typiquement confiée à des entreprises spécialisées mais la personne en charge des modélisations aura souvent une implication pour divers éléments :

1. **Planification des points de mesures.** Évidemment, le responsable de la modélisation sera souvent le mieux placé pour établir le nombre et la localisation des points de mesures en fonction de ses besoins.
2. **Localisation et nombre de pluviomètres.** Ceci dépendra de la superficie du bassin versant, de la complexité et de la topographie générale du secteur. À titre indicatif, un minimum de 2 pluviomètres est recommandé (au cas où un des deux ait un mauvais

fonctionnement), avec une densité qui pourra être variable selon que le secteur se trouve en terrain plat ou plus accidenté (Wapug, 2002). Une valeur qui a été suggérée (WEF MOP FD-17, 1999) est d'avoir un pluviomètre pour 100 ha à 200 ha. On peut par ailleurs, comme le décrit le manuel de la WEF, associer la densité des pluviomètres aux dimensions des cellules orageuses qui sont de l'ordre de 600 à 800 ha de diamètre, ce qui suggère un espacement de 6 à 8 km entre les pluviomètres.

3. **Durée de la campagne de mesures.** Idéalement, on devrait viser à obtenir au moins 3 événements d'importance, ce qui fait qu'une durée d'au moins 1 mois devrait être retenue (idéalement de 2 mois).

Avant leur utilisation pour les étapes de calage et vérification, il y a lieu évidemment d'effectuer une vérification détaillée de la validité des mesures recueillies et d'effectuer une analyse critique de cette information. Idéalement, les événements sélectionnés pour le calage devraient se rapprocher le plus possible des situations qu'on voudra simuler pour la conception. Par exemple, si on veut concevoir le dimensionnement de conduites pour un événement pluvieux relativement important (période de retour 1 dans 5 ans) et que les seuls événements qui ont été mesurés ont une période de retour largement inférieure à 1 dans 2 ans, il faut demeurer prudent lorsqu'on s'appuiera sur un modèle qui aura été calé sur des événements très différents de ceux utilisés pour la conception. Un autre exemple est l'utilisation d'un événement pluvieux très intense et très court pour l'analyse d'un volume de rétention (pour lequel un événement plus contraignant serait plutôt une pluie longue et relativement moins intense).

Une activité de calage nécessitera des investissements qui peuvent devenir importants et on devra toujours évaluer si, en fonction du type et de l'ampleur du projet, une campagne de mesures doit vraiment être complétée. Évidemment, pour la conception d'un nouveau réseau, on ne pourra pas caler le modèle puisque le système n'existe pas. À l'autre extrême, des mesures de débit et de précipitations sont pratiquement toujours nécessaires lorsqu'on désire par exemple analyser le comportement d'un réseau pseudo-domestique ou le contrôle de la qualité de l'eau. Dans ces cas, les processus générant les débits en conduite ou affectant la qualité sont complexes et moins bien

connus (infiltration, influence de la nappe phréatique, évolution des polluants, difficultés de les mesurer, etc.).

Entre ces deux extrêmes, tout dépendra du contexte. En règle générale, pour des réseaux d'égout pluviaux avec des bassins de forme conventionnelle et ayant un pourcentage d'imperméabilité assez élevé, plusieurs études ont démontré que l'utilisation de valeurs par défaut permettait d'obtenir des valeurs adéquates de débit ou de volume à ± 15 à 20 % avec SWMM. Si une précision de cet ordre est jugée acceptable, une campagne de mesures et un calage ne seraient donc pas indispensables.

10.3.5 Échantillonnage et mesures pour polluants

Pour certains cas spécifiques, notamment pour évaluer les impacts de rejets vers le milieu récepteur ou encore pour évaluer l'influence que des ouvrages peuvent avoir sur la qualité de ces rejets, des campagnes de mesures spécifiques pour certains polluants pourront être nécessaires. Ce type de campagne de mesures dans un réseau peut devenir complexe à planifier et à mettre en œuvre à cause notamment de la variabilité qui peut exister dans la qualité des eaux pluviales. Les paramètres impliqués peuvent varier grandement à un site en particulier, tant entre différents événements pluvieux que pendant un événement donné; par conséquent, un nombre d'échantillons trop restreint ne pourra pas vraisemblablement donner une évaluation adéquate pour un site donné ou pour l'évaluation d'une PGO. La collecte d'un nombre suffisant d'échantillons est donc généralement nécessaire pour pouvoir caractériser de façon suffisamment précise la qualité des eaux de ruissellement à un site ou pour une PGO.

Il devient donc dans ce contexte important que la campagne de mesures soit bien planifiée, avec une identification claire des buts, du type et de la qualité des données nécessaires pour atteindre ces buts. Des ressources considérables, tant en personnel qu'en coûts, peuvent être nécessaires pour mener à bien ce type de campagnes. D'autres approches pourront être utilisées si ces ressources ne sont pas disponibles (Geosyntec *et al.*, 2002) :

- Utiliser une approche par phase, en se restreignant par exemple à un sous-bassin en particulier ou aux questions les plus importantes.
- Limiter le nombre de polluants à évaluer plutôt que de réduire le nombre d'échantillons.
- Utiliser les données disponibles dans la littérature sur

d'autres sites comparables pour supporter la prise de décision.

La sélection des paramètres à mesurer est évidemment importante et pourra varier en fonction des objectifs. Les polluants standard pouvant permettre de caractériser les eaux pluviales sont (EPA, 1983) :

- La concentration des MES (Matières en suspension);
- DBO (Demande biochimique en oxygène);
- DCO (Demande chimique en oxygène);
- Cu (Cuivre);
- Pb (Plomb);
- Zn (Zinc);
- Phosphore total;
- Phosphore soluble;
- NTK - Azote total Kjeldahl;
- Nitrates et nitrites.

Les facteurs suivants peuvent influencer le choix des paramètres à considérer (Strecker, 1994) :

- Le polluant a été identifié dans les eaux de ruissellement urbain à des concentrations pouvant causer une dégradation de la qualité.
- Les méthodes d'échantillonnage pour le polluant sont simples et fiables pour du personnel méticuleux.
- Les analyses du polluant sont économiques pour une grande échelle.
- Le traitement est une option viable pour réduire la charge de polluant.

La liste de polluants donnée plus haut est un point de départ et peut ne pas complètement représenter les polluants pour certains cas particuliers. Il y a souvent un compromis à faire entre l'étendue des polluants couverte et le nombre d'échantillons pour un même coût et il pourra devenir intéressant de limiter le nombre de polluants suivis pour augmenter le nombre d'échantillons. De plus, certains paramètres sont connus pour être fortement corrélés avec d'autres polluants, qui sont plus difficiles à mesurer. Le tableau 10.5 donne des exemples de ces paramètres de substitution.

Tableau 10.5

Polluants qui peuvent être analysés par corrélation avec d'autres polluants (Geosyntec et al., 2002).

Paramètre substitut	Paramètre représenté par le substitut
Turbidité	MES
Coliformes fécaux	Pathogènes
DCO	DBO

Plusieurs guides ont été publiés pour la planification et la mise en œuvre des campagnes de mesures pour les polluants et on pourra y référer au besoin (Geosyntec et al., 2002; USGS, 2000; Shaver et al., 2007; FHWA, 2001; WEF MOP FD-17, 1999).

10.3.6 Calage et vérification

Aspects généraux

Selon Marsalek (1977), les deux principales fonctions du calage d'un modèle sont (1) de fournir des estimations pour les paramètres d'entrée qui sont difficilement mesurables directement et (2) de compenser jusqu'à un certain degré pour les insuffisances et déficiences mineures du modèle. Le calage peut également servir à indiquer quels sont les paramètres les plus sensibles pour le système à l'étude.

Bien que des approches d'optimisation formelles soient possibles, le calage est souvent un processus itératif d'essai-erreur. L'objectif est de trouver les valeurs optimales de chaque paramètre, en commençant avec les plus sensibles et en procédant ensuite avec ceux qui le sont moins. Lors des étapes de calage, il est essentiel de garder à l'esprit le ou les paramètres qui sont le plus importants pour le projet. Les 3 paramètres qui sont typiquement analysés sont **le débit de pointe, le volume de ruissellement ou le temps de réponse**. Il est souvent difficile d'en arriver à un calage qui sera entièrement satisfaisant pour ces trois paramètres en même temps et on doit parfois adapter le calage en conséquence. Chacun des trois paramètres peut être plus important dans certaines situations spécifiques :

Débit de pointe : pour le dimensionnement des conduites et pour estimer la capacité résiduelle de conduites existantes.

Volume de ruissellement : lorsque de la rétention est considérée ou pour le contrôle des débordements d'eaux usées dans le cas d'un réseau unitaire.

Temps de réponse : peut devenir important dans

l'analyse d'un grand réseau lorsque de larges collecteurs se combinent; une mauvaise évaluation de ce paramètre peut avoir un impact significatif sur les débits de pointe simulés. Ce paramètre peut également devenir important dans le cas d'un projet de contrôle en temps réel de réseaux.

Le calage pour les polluants peut évidemment être influencé par les paramètres quantitatifs mais fait intervenir d'autres facteurs qui peuvent rendre plus complexe le processus de calage. Certaines références discutent plus en profondeur du calage pour les aspects qualitatifs et on pourra s'y référer (WEF MOP FD-17, 1999; Wanielista, 1993).

On devra également tenir compte dans ce type d'analyse des erreurs inhérentes aux instruments de mesure utilisés, qui peuvent dans certains cas être importantes. De plus, l'exactitude des données brutes de débit doit toujours être vérifiée avant son utilisation dans un processus de calage, en particulier pour des conduites avec de faibles pentes (donc avec de faibles vitesses) et lorsqu'il y a possibilité d'un contrôle aval pouvant venir affecter les mesures de vitesse et de hauteurs d'eau au site à l'étude.

Comme on le spécifiait à la section précédente sur les campagnes de mesures, il faudrait viser à obtenir des informations sur un nombre minimal de 5 ou 6 événements (minimalement 3 événements), qui devraient idéalement couvrir une large plage en ce qui concerne le type de précipitation. Par exemple, si le modèle doit être utilisé pour la conception, il n'est probablement pas très important qu'il soit très juste pour des petites pluies. Si on veut par contre bien simuler la qualité de l'eau, il devient plus nécessaire de reproduire adéquatement le comportement du système lorsque soumis à des petites pluies puisque la majeure partie de la pollution est associée à ces plus petits événements.

Règles pour le calage

Certaines règles générales peuvent être suggérées pour le calage d'un modèle avec SWMM. Essentiellement, la plupart des paramètres qui sont susceptibles d'être calés sont contenus dans le bloc de calculs qui génère les débits de ruissellement. Il faut toutefois garder à l'esprit que le laminage en conduite pourra aussi avoir un effet significatif sur les débits de pointe ou le temps de réponse, en particulier pour des collecteurs de grandes dimensions et installés avec de faibles pentes.

Après avoir établi que la forme générale des hydrogrammes correspond bien à celle des enregistrements de pluie (ce qui, dans le cas contraire, indiquerait que la pluie mesurée n'est pas celle qui aurait généré les débits mesurés), les règles de base suivantes peuvent permettre d'en arriver assez aisément à un calage satisfaisant, pourvu évidemment que cet exercice s'appuie sur des mesures de bonne qualité (tant de la précipitation que des débits) :

1. Ajustement du volume de ruissellement sur les surfaces imperméables, en ajustant surtout le pourcentage imperméable et les dépressions de surface. On doit tenter dans ce cas de sélectionner des événements pluvieux qui sont survenus après une période de temps sec, de façon à minimiser le ruissellement provenant des surfaces perméables.
2. Ajustement de la forme générale de l'hydrogramme (débit de pointe et temps de réponse). Principalement en modifiant surtout la largeur de drainage (variable W dans SWMM) et, dans une moindre mesure, la pente du bassin et le coefficient de Manning pour le ruissellement de surface.
3. Ajustement plus fin du calage, à l'aide d'un ajustement sur les autres paramètres comme ceux associés à l'infiltration et aux dépressions de surface (surfaces perméables).

Fonctions et critères d'évaluation

Lors du calage, un des aspects à définir est de savoir selon quel critère le modèle pourra être jugé raisonnablement bien calé. Encore là, plusieurs fonctions d'évaluation ont été suggérées pour établir la qualité du calage (James, 2003). Celles qui sont les plus utilisées sont les suivantes :

$$\text{Min } F = \sum_{i=1}^n (q_i - r_i)^2 \quad (10-1)$$

où F est le critère pour juger de la qualité du calage (qui doit être minimisé); q_i est la valeur observée ou mesurée pour l'événement i ; r_i est la valeur simulée et n est le nombre de paires de points. Cette simple fonction donne généralement de bons résultats (James, 2003), quoiqu'elle tend à favoriser les larges erreurs et les débits importants. Une façon de limiter l'impact des déviations pour les grands débits est d'utiliser les logarithmes :

$$\text{Min } F = \sum_{i=1}^n (\ln(q_i) - \ln(r_i))^2 \quad (10-2)$$

D'autres études ont par ailleurs établi que la fonction dite de Nash produisait moins de variabilité que les autres :

$$1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{r_i}{q_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{q_i}{q_i}\right)^2} \quad (10-3)$$

où q_i est le débit moyen mesuré.

Si le résultat recherché est de définir le diamètre d'une conduite, on peut examiner la différence incrémentale entre deux dimensions standards de conduites, ce qui peut varier dans une large gamme dépendant du diamètre de la conduite. Par ailleurs, on retrouve typiquement dans certaines références les niveaux de précision suivants pour juger de la qualité de calage (James, 2003) :

Pour temps sec (dans le cas d'un réseau unitaire ou sanitaire)

± 5 % pour le volume;

± 10 % pour le débit.

Pour le temps de pluie

± 10 % pour le volume

± 15 % pour le débit.

James (2003) rapporte également les critères d'un groupe d'utilisateurs en Grande-Bretagne (Wapug, 2002) qui recommande les balises suivantes (avec un minimum de trois événements majeurs) :

Débit de pointe : + 25 % à - 15 %

Volume : + 20 % à - 10 %

Hauteur de surcharge : + 0,5 m à - 0,1 m

Forme générale des hydrogrammes (mesurés et simulés) : devrait être similaire.

Il apparaît important en terminant cette discussion sur le calage de parler de la précipitation, qui joue évidemment un rôle majeur pour la modélisation du ruissellement urbain. À cause essentiellement de la trop faible densité des pluviomètres sur le territoire étudié, cette donnée d'entrée peut devenir une source importante d'incertitude. Le calage d'un modèle peut être très difficile (même impossible dans certains cas) si on ne dispose pas d'information sur la pluie à un niveau de détail suffisant et il faut toujours garder cet aspect à l'esprit lorsqu'on tente de caler le modèle. Particulièrement dans le cas d'orages d'été, on peut souvent observer une variabilité spatiale considérable de la pluie, même sur un territoire de quelques kilomètres carrés.

10.4 UTILISATION DES MODÈLES

De façon à ce que les modèles développés puissent être modifiés et adaptés au besoin lors de mise à jour et de changement dans les hypothèses de base, il est essentiel que les activités de développement soient bien documentées dans un rapport technique. Minimale-ment, ce rapport devrait décrire le ou les objectifs du modèle en fonction du projet, inclure s'il y a lieu les résultats de la campagne de mesures et du calage, regrouper les hypothèses de base pour l'élaboration du modèle et les résultats des simulations obtenus, le tout appuyé par des figures et graphiques appropriés pour rendre facilement compréhensible l'utilisation qui est faite du modèle.

Comme le montre la figure 10.3, l'application d'un modèle peut se faire selon 5 étapes, qui pourront être séquentielles ou non. Par exemple, des échantillonnages ou des mesures additionnelles pourront se faire après le calage d'un modèle pour en vérifier la validité. Le logiciel doit généralement être celui le plus simple qui pourra être applicable à la situation. Les principaux facteurs à considérer sont les objectifs, les caractéristiques du système à l'étude et la compatibilité des données disponibles avec celles qui sont requises par le logiciel. Deux éléments particuliers orienteront souvent le choix d'un logiciel pour les analyses : la possibilité d'étudier des écoulements en charge (nécessaires dans la plupart des cas pour l'analyse de réseaux existants) et la qualité des eaux.

Évidemment, l'objectif dans tout effort de modélisation est l'utilisation du modèle pour l'analyse des conditions différentes de celles prévalant actuellement. L'évaluation comparative de différentes alternatives imposera typiquement la définition d'une condition de base, qui pourra être celle pour les réseaux existants ou encore celle sans développement. À partir de ces conditions de base, on pourra par la suite évaluer ce que peuvent devenir les conditions si le développement se réalise sans modification aux réseaux ou avec des interventions aux réseaux qui pourront être définies.

En terminant, il apparaît important de souligner que la validité et l'incertitude des résultats obtenus par modélisation sont souvent plus fortement dépendantes de l'expérience et des connaissances de la personne responsable de la modélisation et du soin avec lequel le modèle est développé que du logiciel lui-même. Les sources d'incertitude dans un modèle peuvent inclure les représentations mathématiques des processus, les problèmes

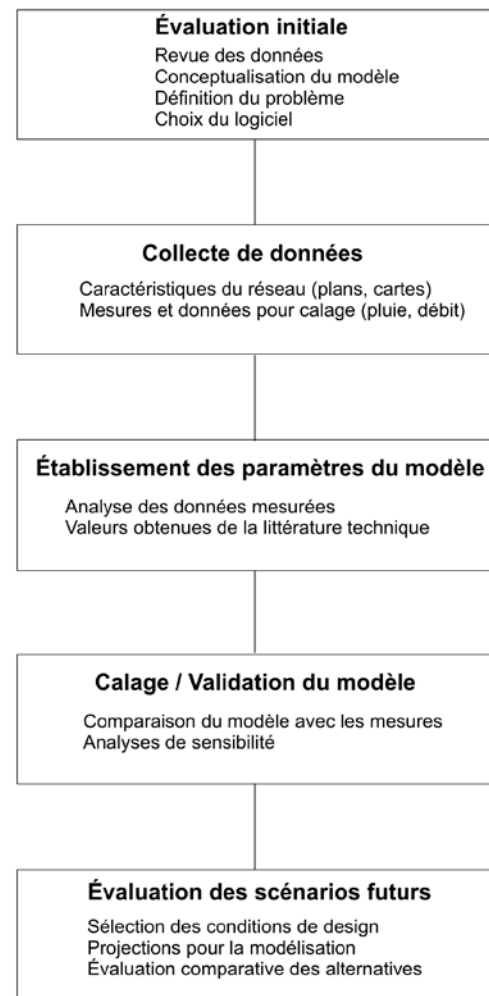


Figure 10.3 Étapes à considérer pour l'utilisation d'un modèle.

de calculs numériques, le niveau de détail, les valeurs assumées pour les caractéristiques du système, les données d'entrée et la définition des conditions initiales. La façon dont les résultats de la modélisation sont évalués et utilisés dans le processus de prise de décision en fonction des incertitudes dépend des connaissances et du jugement de l'utilisateur.

Malgré ces quelques réserves, la modélisation est un outil privilégié en hydrologie urbaine puisqu'elle permet d'obtenir une meilleure compréhension des systèmes à l'étude et de fournir à l'utilisateur une base pour une prise de décision éclairée; on peut trouver là un de ses plus grands avantages. Considérant le coût relativement mineur qu'elle implique dans plusieurs cas comparative-ment aux coûts des travaux et d'interventions qui doivent être analysés, elle devrait être encouragée sauf pour les projets très simples.

RÉFÉRENCES

- ASCE/WEF (1992). *Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems*. American society of civil engineers and Water environment federation, New York.
- ASCE (American Society of Civil Engineers) et WEF (Water Environment Federation) (1998). *Urban stormwater quality: planning, management and BMP design*. Manuel de pratique, New York.
- Bedient, P. B. et Huber, W. C. (1988). *Hydrology and floodplain analysis*, Addison-Wesley publishers, Reading, MA.
- CWP (2007). *National Pollutant Removal Performance Database*. Center for Watershed Protection, Elliot City, Maryland.
- EPA (1983). *Environmental Protection Agency des États-Unis. Results of Nationwide Urban Runoff Program*. EPA-PB/84-185552.
- Geosyntec et Wright Water Engineers (2008). *Analysis of treatment system performance. International stormwater best management practices (BMP) database (1999-2008)*. Programme de suivi ASCE/WEF.
- GeoSyntec, Urban Drainage and Flood Control District et UWRRC. (2002). *Urban stormwater BMP performance monitoring – A guidance manual for meeting the national stormwater BMP database requirements*. Rapport EPA-821-B-02-001 pour ASCE/EPA, Washington, DC.
- Huber, W. C. (1985). *Deterministic modeling of urban runoff quality, Urban runoff pollution*, series G : Ecological Sciences, NATO ASI Series, H. C. Torno, J. Marsalek et M. Desbordes (éditeurs), vol. 10, Springer-Verlag, New York.
- James, W. (2003). *Rules for responsible modelling*. CHI Publications, Computational Hydraulics International, Guelph, Ontario.
- Marsalek, J. (1977). (2005). *Data collection, instrumentation and verification of models*. Proc. Conf. Modeling Concepts Urban drainage, Paper no. 8.
- Minton, G. (2005). *Stormwater treatment: Biological, chemical, and engineering principles*. Resource Planning Associates, Seattle, WA.
- Schueler, T. (1987). *Controlling urban runoff: a practical manual for planning and designing urban BMPs*. Department of Environmental Programs. Metropolitan Washington Council of Governments, Washington, DC.
- Shaver, E., Horner, R., Skupien, J., May, C. et Ridley, G. (2007). *Controlling urban runoff: a practical manual for planning and designing urban BMPs*. Department of Environmental Programs. Metropolitan Washington Council of Governments. North American Lake Management Society et EPA, Madison, WI.
- Walesh, S. (1989). *Urban Surface water management*. Wiley, New York.
- Wapug (Wastewater Planning Users Group) (2002). *Code of practice for the hydraulic modelling of sewer systems*, version 3.0, Wapug Committee, Londres.
- WEF (Water Environment Federation) (1999). *Prevention and control of sewer system overflows*, MOP FD-17, Virginie.
- Wanielista, M. et Yousef, Y. A. (1993). *Stormwater management*. John Wiley and sons, New York.