

## CHAPITRE 1

### CONTEXTE, PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIF DE LA RECHERCHE

#### 1.1 Contexte

L'évolution des réglementations sur l'eau à l'échelle mondiale a favorisé le développement des infrastructures d'assainissement et la diminution des rejets d'eaux usées non traitées vers le milieu naturel. Aux États Unis, le « Construction Grants Program » a financé le développement des infrastructures d'assainissement pour répondre aux exigences de la réglementation du « Clean Water Act ». Ce programme a fait passer le nombre de stations d'épuration de 14051 en 1968 à 16202 en 2000 et le pourcentage de stations d'épuration effectuant un traitement secondaire de 72% en 1968 à 99% en 1999. Cependant, les pourcentages d'eaux combinées rejetées au milieu naturel atteignaient encore les 20% en 2004 (U.S. Environmental Protection Agency, 2004). En France, la loi sur l'eau de 1992 a pris en compte les objectifs énoncés dans la directive européenne 91/271/CEE du 21 mai 1991 relative au traitement des eaux urbaines résiduaires. La France est ainsi passée de 2115 stations d'épuration en 1970 à 14377 fin 2000. De plus, le rendement des stations d'épuration pour les matières oxydables est passé de 68% en 1984 à 80% en 2000 (DATAR et IFEN, 2000). La nouvelle directive européenne 2000/60/CE du 23 octobre 2000 sur la gestion de l'eau est encore plus restrictive puisqu'elle prévoit une obligation de résultats (Miquel, 2003) en lieu et place de l'obligation de moyens. Au Québec, le programme d'assainissement des eaux du Québec lancé en 1978 a financé la mise en conformité des réseaux d'assainissement avec la loi sur la qualité de l'environnement (Yergeau, 1988). Ce programme a fait passer de 2% en 1978 à 98% en 2000 le pourcentage des eaux sanitaires traitées, grâce à la construction de plus de 568 stations d'épuration (Ministère de l'environnement, 1999). Cependant, la mise à niveau des réseaux d'assainissement

n'a pas supprimé l'ensemble des dysfonctionnements. En effet, les débordements en temps de pluie restent la principale source de pollution à tort au Québec. À titre d'exemple, entre 16 et 18 déversements se produisent entre le 1 mai et le 31 octobre sur l'intercepteur Nord de l'île de Montréal (Boulay *et al.*, 1999). Aux problèmes des débordements viennent s'ajouter les problèmes d'inondation. À titre d'exemple, la ville de Laval enregistre en moyenne 500 plaintes par année pour causes d'inondation (CH2M Hill Engineering Limited, 1992).

L'évaluation de la performance hydrologique et hydraulique d'un réseau d'assainissement permet de quantifier les dysfonctionnements et d'en cerner les origines (Valiron et Tabuchi, 1992), (Réseau Environnement, 1999). L'évaluation de la performance hydrologique et hydraulique d'un réseau d'assainissement peut se faire à l'aide d'un système de gestion en temps différé.

### **1.1.1 La gestion en temps différé des réseaux d'assainissement**

La gestion en temps différé consiste à évaluer la performance de fonctionnement d'un réseau d'assainissement afin d'aider le gestionnaire dans ses prises de décision technique (Days, 2000). La performance de fonctionnement d'un réseau d'assainissement s'évalue au regard de la quantité et de la qualité des eaux rejetées dans le milieu naturel.

La Figure 1 présente un système de gestion en temps différé.

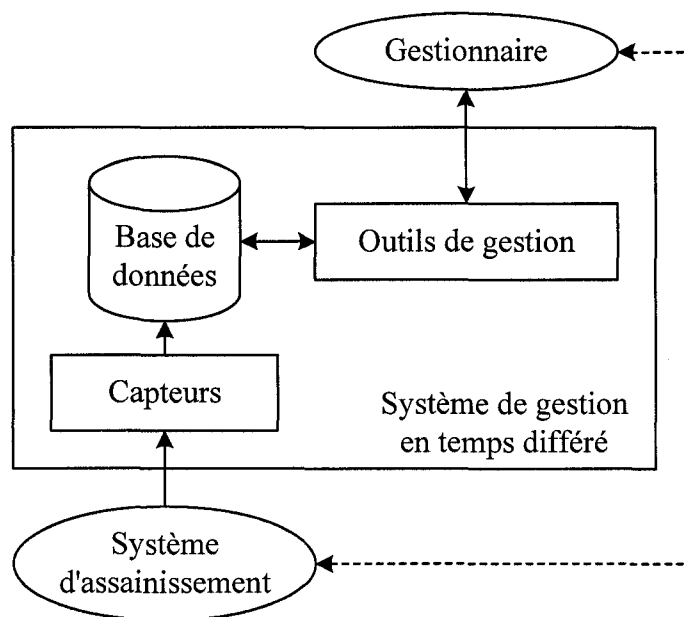


Figure 1 Système de gestion en temps différé

Les systèmes de gestion en temps différé sont constitués de capteurs qui relèvent des données quantitatives et qualitatives sur le réseau d'assainissement. Une base de données sert à stocker l'information recueillie. Enfin, des outils informatiques permettent d'exploiter les données.

Les outils de gestion informatique (Valiron, 1988) des réseaux d'assainissement comprennent une partie ou la totalité des fonctionnalités suivantes :

- des outils de validation des données;
- des outils de simulation des réseaux d'assainissement;
- des outils d'analyse et de visualisation des données.

Les outils de validation des données sont généralement constitués de procédures et de règles statistiques qui permettent de traiter et trier les données avant de pouvoir les utiliser. Ces outils ont émergé récemment avec la hausse importante du nombre de données mesurées dans les réseaux d'assainissement instrumentés. Ils ont été développés pour rationaliser et automatiser la validation des données mesurées.

Les outils de simulation sont constitués de modèles hydrologiques et hydrauliques. Ils servent à simuler les hydrogrammes et les pollutogrammes à l'exutoire des réseaux d'assainissement.

Les outils d'analyse et de visualisation fournissent une représentation graphique des données mesurées ou simulées. De plus, ils permettent de générer des bilans statistiques sur le fonctionnement du réseau.

### **1.1.2 Le logiciel PRÉVAL**

Le logiciel PRÉVAL (Bennis, 2004a), (Crobeddu et Bennis, 2004) est un outil de gestion en temps différé des réseaux d'assainissement. La Figure 2 présente l'agencement des différents modules de PRÉVAL.

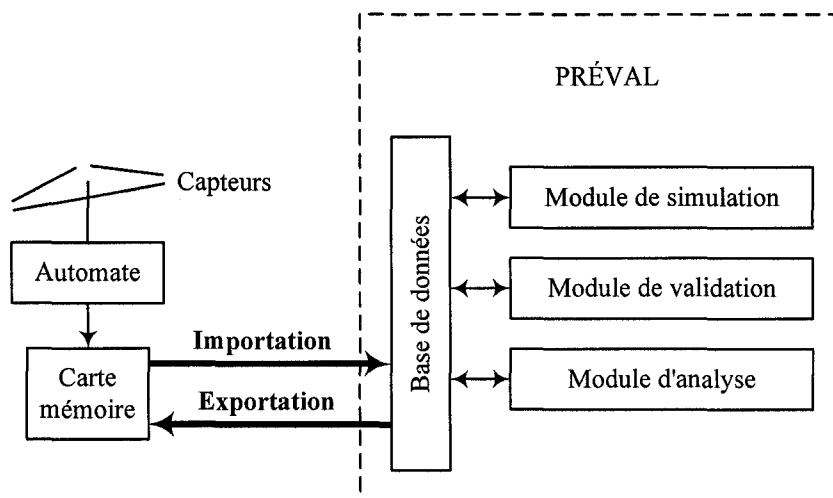


Figure 2 Le logiciel PRÉVAL

PRÉVAL dispose d'une base de données qui permet d'importer et de stocker les données mesurées dans un format utilisable par le logiciel. Les données mesurées sur le réseau peuvent être validées à l'aide d'un module de validation ou servir à faire fonctionner le module de simulation. Le module de simulation et de validation s'utilise en série ou en parallèle. Le module de simulation fait une modélisation macroscopique des processus de ruissellement (Abdelaziz et Bennis, 2005), (Bennis et Crobeddu, 2005) et de lessivage (Temimi et Bennis, 2002) des bassins urbains. De plus, il modélise le déversement au travers des déversoirs d'orage. Le module de validation intègre deux classes de méthodes de validation qui permettent de corriger les aberrations et les bruits dans les séries de données. Premièrement, des méthodes de validation univariées (Berrada *et al.*, 1996) qui traitent individuellement les séries de données. Deuxièmement, des méthodes de validation multivariées (Bennis *et al.*, 1996) qui traitent conjointement des séries de données fortement corrélées. Au final, l'information générée par le module de validation et de simulation est utilisée par le module d'analyse pour réaliser de l'évaluation hydraulique d'ouvrages d'assainissement, de la simulation de débits de ruissellement, de la simulation de charges de polluants et des bilans de rejets.

## 1.2 Problématique

Les systèmes de gestion en temps différé contiennent des modèles hydrologiques et hydrauliques qui simulent le ruissellement, le lessivage des sols et le fonctionnement des déversoirs d'orage. Dans le cadre d'une utilisation par des ingénieurs praticiens, les modèles de simulation du ruissellement, du lessivage des sols et des déversoirs d'orage présentent plusieurs des lacunes suivantes (Nix, 1994), (O'Loughlin, Huber et Chocat, 1996), (Tsihrintzis et Hamid, 1997), (Zug *et al.*, 2001) :

- une formulation peu robuste. En effet, certains modèles ont une formulation mathématique inadaptée qui engendre des problèmes de convergence et de stabilité numérique.
- un niveau d'explication inadéquat. En effet, certains modèles ont un niveau de détails trop important. Par conséquent, l'utilisation de ces modèles exige beaucoup de données de terrain. De plus, ils fournissent des informations surabondantes. À contrario, certains modèles ont une formulation trop artificielle. Par conséquent, ils ne rendent pas compte du fonctionnement du système. De plus, ils empêchent l'utilisateur d'exercer son regard critique.
- un manque de versatilité. En effet, les modèles de simulation ont une finalité unique qui est la conception ou l'analyse.
- un manque de flexibilité. En effet, les modèles de simulation ont souvent été conçus pour fonctionner sur des sites particuliers. De plus, ils sont souvent inutilisables en l'absence de données mesurées.
- un manque de compatibilité. En effet, la plupart des modèles ont été développés indépendamment les uns des autres. Par conséquent, ils peuvent difficilement être associés ou alors, au prix d'une perte de cohérence et d'efficacité de l'ensemble.

### 1.3 Objectifs de la recherche

L'objectif de cette recherche est de développer l'ossature d'un outil de simulation des réseaux d'assainissement pour un système de gestion en temps différé. L'outil de simulation envisagé est décrit sur la Figure 3.

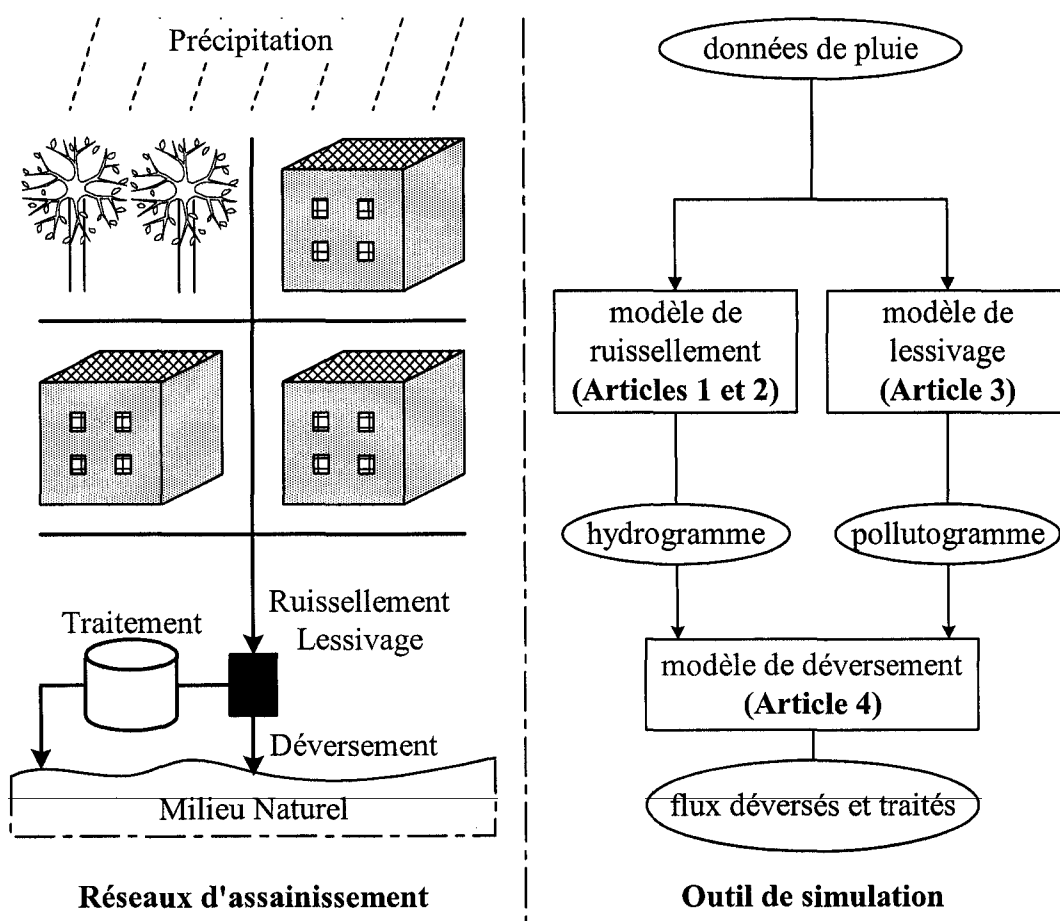


Figure 3 Outil de simulation des réseaux d'assainissement pour un système de gestion en temps différé

Les objectifs spécifiques de la recherche sont les suivants :

- 1- développer un modèle pour simuler les débits de ruissellement à l'exutoire d'un réseau d'assainissement;
- 2- développer un modèle pour simuler les charges de matières en suspension à l'exutoire d'un réseau d'assainissement;
- 3- développer une approche pour le suivi et la validation des débits déversés par un déversoir d'orage latéral.

Ces trois modèles doivent avoir une formulation robuste, un niveau d'explication adéquat, de la versatilité, de la flexibilité et une bonne compatibilité.



## CHAPITRE 2

### REVUE DE LITTÉRATURE SUR LES OUTILS DE SIMULATION DES RÉSEAUX D'ASSAINISSEMENT

#### 2.1 Introduction

Les phénomènes hydriques en milieu urbain peuvent se décrire à l'aide de modèles déterministes, conceptuels ou empiriques (Yen, 1986), (Jovanovic, 1986). Les modèles déterministes simulent les variables de sortie d'un système hydrique en explicitant complètement ses mécanismes à l'aide des lois de la physique. Ces lois font intervenir les variables d'entrée et les paramètres physiques du système. En théorie, les modèles déterministes ne requièrent pas de calage. Les modèles conceptuels simulent les variables de sortie d'un système hydrique à l'aide de fonctions de transformation qui font intervenir les variables d'entrée du système et des paramètres conceptuels. Les modèles conceptuels requièrent un calage pour fixer la valeur des paramètres des fonctions de transformation. Les modèles empiriques simulent les variables de sortie d'un système hydrique à l'aide de fonctions statistiques. Ces fonctions font intervenir les variables d'entrée du système, les paramètres physiques influents et des paramètres statistiques. Les modèles empiriques requièrent un grand nombre de données mesurées pour choisir la fonction statistique optimale et caler la valeur de ses paramètres. Ces trois catégories de modèle ont donné naissance à de nombreux outils de simulation des réseaux d'assainissement utilisés par les ingénieurs praticiens (American Society of Civil Engineers and Water Environment Federation, 1992), (Nix, 1994), (Viessman et Lewis, 2003), (Freni *et al.*, 2003). Ce chapitre recense les outils opérationnels éprouvés pour la simulation des réseaux d'assainissement. Il s'attache plus particulièrement à décrire les avantages et les limites des modèles utilisés par ces outils pour simuler le ruissellement, le lessivage des sols et les déversoirs d'orage.

## 2.2 L'outil KINEROS

L'outil KINEROS (Woolhiser *et al.*, 1990) simule le ruissellement et le lessivage des sols sur les petits bassins urbains pour des événements pluvieux ponctuels.

KINEROS modélise le ruissellement à l'aide du modèle déterministe de l'onde cinématique. Ce modèle est une simplification des équations de Barré de Saint-Venant pour les écoulements à surface libre. Le caractère déterministe de l'onde cinématique existe uniquement pour des bassins homogènes (Ponce, 1991). Or, la nature des surfaces en milieu urbain varie grandement dans l'espace. Par conséquent, l'application de l'onde cinématique nécessite une subdivision du bassin en plusieurs sous bassins homogènes. La détermination des paramètres physiques pour chaque sous bassins nécessite un nombre élevé de mesures qui sont difficiles et coûteuses à obtenir. De plus, la durée de résolution de l'onde cinématique est grande comparativement à celle des modèles de ruissellement non déterministes. En revanche, le modèle de l'onde cinématique simule convenablement les hydrogrammes de ruissellement sans calage préalable (Duru et Hjelmfelt, 1994). L'onde cinématique peut également servir à modéliser globalement un bassin. Cependant, elle perd son caractère déterministe et entre en compétition avec des modèles conceptuels qui ont une formulation plus simple et une précision équivalente.

L'outil KINEROS modélise le lessivage des sols à l'aide d'un modèle déterministe. Ce modèle décrit l'érosion, la déposition et le transport des particules solides sous l'effet des précipitations et du ruissellement. L'érosion due aux précipitations varie selon le carré de l'intensité des précipitations. L'érosion due au ruissellement varie en fonction de la contrainte de cisaillement au niveau du sol. L'intensité de déposition des particules solides varie en fonction du rapport entre la concentration en particules solides des eaux ruisselées et la capacité de transport de ces mêmes eaux. Enfin, le transport des

particules solides se fait à l'aide d'une équation de bilan massique inspirée de l'onde cinématique (Bennett, 1974). En théorie, l'approche déterministe du modèle KINEROS ne nécessite pas de calage. Néanmoins, l'efficacité du modèle repose sur la connaissance précise de l'occupation des sols et des caractéristiques physiques des particules solides du bassin (Kalin et Hantush, 2003), (Lajili-Ghezal, 2004).

### 2.3 L'outil HSPF

L'outil HSPF (Bicknell *et al.*, 2001) simule en continu les flux hydriques et les flux de polluants à l'exutoire de petits ( $< 2,5\text{km}^2$ ) ou de grands bassins.

Le modèle de ruissellement de l'outil HSPF reprend la formulation du modèle conceptuel SWM (Crawford, 1966). Le modèle de ruissellement de l'outil HSPF est un modèle de réservoir non linéaire qui représente en détail, le bilan hydrique à la surface d'un bassin. Le modèle du réservoir non linéaire de l'outil HSPF est issu de la combinaison de l'équation de continuité avec l'équation de Chezy-Manning pour les écoulements turbulents. Ce modèle de ruissellement a besoin de nombreuses données, sur l'état hydrique du bassin, pour pouvoir réaliser des simulation précises (Johnson *et al.*, 2003).

HSPF reprend les modèles conceptuels utilisés par l'outil NPS (Donigian et Crawford, 1976) pour modéliser l'accumulation des particules solides durant la phase de temps sec ainsi que leur arrachement et leur transport en temps de pluie. L'accumulation des particules est modélisée par une fonction exponentielle de la durée de temps sec. L'arrachement des particules varie exponentiellement en fonction de l'intensité des précipitations. Enfin, le transport des particules solides dépend de la masse de particules solides arrachées et de la capacité de transport des eaux de ruissellement. Il est décrit par une fonction linéaire du débit de ruissellement. Le modèle de lessivage de HSPF

comprend un nombre important de paramètres. Par conséquent, le calage de ces paramètres nécessite de nombreuses données mesurées (Saleh et Du, 2004). Cependant, Moore *et al.* (1988) ont montré, lors d'une simulation continue d'un petit bassin urbain, que le modèle HSPF donne en général une bonne estimation des charges de particules solides lessivées.

#### **2.4 L'outil SWMM**

L'outil SWMM (Huber et Dickinson, 1988) est certainement le plus utilisé en Amérique du Nord. Il sert à concevoir et analyser les réseaux d'assainissement. SWMM modélise en détail l'hydrologie et l'hydraulique des réseaux d'assainissement.

L'outil SWMM simule le ruissellement à l'aide d'un modèle de réservoir non linéaire (Metcalf and Eddy Inc., 1971). Ce modèle est issu de la combinaison de l'équation de continuité et de l'équation de Manning. Les paramètres du modèle de réservoir non linéaire ne nécessitent pas de calage lorsque le bassin est divisé en sous bassins homogènes (Marsalek *et al.*, 1975). En revanche, ses paramètres doivent être calés dans le cas d'une modélisation globale du bassin. Le modèle du réservoir non linéaire de SWMM simule le ruissellement avec précision pour les pluies de durée supérieure au temps de concentration. En revanche, la modélisation est imprécise pour les pluies de durée inférieure au temps de concentration (Xiong et Melching, 2005).

L'outil SWMM utilise des modèles conceptuels pour simuler l'accumulation, l'arrachement et le transport des particules solides à la surface d'un bassin. L'accumulation en période de temps sec augmente exponentiellement en fonction du temps. L'arrachement et le transport des particules solides sont décrits par une fonction exponentielle du débit de ruissellement. Le modèle de lessivage de SWMM doit être calé avec un nombre important de mesures pour pouvoir simuler précisément les charges

de particules solides (Tsihrintzis et Hamid, 1998a). Sans calage, le modèle de lessivage fournit des résultats erronés.

L'outil SWMM simule globalement le fonctionnement des déversoirs d'orage à l'aide de lois hydrauliques semi empiriques. Or, des études théoriques (Carleton, 1985), (Garcia Salas, 2003) ont montré qu'une modélisation globale des déversoirs d'orage, à l'aide de lois semi empiriques, peut conduire à d'importantes erreurs de simulation. En revanche, les lois de déversement de SWMM fonctionnent en association avec les modèles de laminage en conduite. Par conséquent, les modèles hydrauliques pour les déversoirs prennent en compte les influences aval et les mises en charge.

## 2.5 L'outil AUTO\_QI

L'outil AUTO\_QI (Terstriep *et al.*, 1990) est utilisé pour concevoir et analyser les réseaux d'assainissement. C'est une version améliorée des modèles ILLUDAS et Q\_ILLUDAS. Il est destiné aux réseaux de petite et moyenne dimensions.

Le ruissellement dans l'outil AUTO\_QI est décrit à l'aide d'une variante (Terstriep et Stall, 1974) de l'hydrogramme unitaire de Clark (1945). Cet hydrogramme unitaire est plus connu sous le nom de méthode aire-temps. AUTO\_QI modélise le bassin versant à l'aide de deux courbes aire-temps. La première courbe représente la contribution des surfaces perméables et la seconde courbe, la contribution des surfaces imperméables. La contribution maximale du bassin est atteinte au temps d'équilibre calculé à l'aide de la formule de Izzard (1946). L'utilisation du modèle AUTO\_QI implique un découpage fin du bassin (Heeps et Mein, 1974). Par conséquent, un temps relativement important doit être consacré à l'acquisition des données pour le paramétrage du modèle. En revanche, le modèle simule convenablement les débits ruisselés (Tsihrintzis et Sidan, 1998b).

L'outil AUTO\_QI utilise des modèles conceptuels pour simuler l'accumulation et le lessivage des particules solides. Une relation linéaire, prenant en compte la durée de temps sec, décrit l'accumulation des particules solides sur le bassin. Le lessivage des particules solides est modélisé par une fonction exponentielle du débit de ruissellement. Ce modèle conceptuel présente l'inconvénient de devoir être calé à l'aide d'un nombre important de données mesurées. Néanmoins, le modèle de lessivage de AUTO\_QI semble donner des résultats équivalents à ceux du modèle de lessivage de SWMM (Noel et Terstriep, 1982).

## **2.6 L'outil STORM**

L'outil STORM (Hydrologic Engineering Center, 1977) est dédié à la simulation en continu de la quantité et de la qualité des eaux de ruissellement à l'exutoire des réseaux d'assainissement.

L'outil STORM simule le ruissellement à l'aide de la méthode empirique du SCS « soil conservation service » (Soil Conservation Service, 1972). L'avantage de la méthode du SCS repose sur sa simplicité. En effet, le calage de la méthode du SCS se limite à l'ajustement d'un seul paramètre. De plus, une justification théorique des hypothèses de la méthode du SCS a été apportée récemment par Yu (1998). En revanche, l'outil STORM utilise des pluies horaires pour calculer le ruissellement. Par conséquent, les hydrogrammes de ruissellement issus de STORM ne sont pas précis.

STORM décrit l'accumulation et le lessivage des particules solides à l'aide de modèles conceptuels. L'accumulation est calculée à l'aide d'une fonction linéaire qui prend en compte la durée de temps sec et le linéaire de caniveaux. La charge de particules solides lessivées est calculée à l'aide d'une relation exponentielle qui fait intervenir la masse

accumulée et le débit de ruissellement. L'utilisation de STORM sur différents bassins urbains a donné des résultats mitigés (Warwick et Wilson, 1990).

## 2.7 L'outil MOUSE

L'outil MOUSE (DHI, 2000a) est utilisé pour faire du dimensionnement ou de l'analyse hydraulique des réseaux d'assainissement. Cet outil modélise en détail l'hydrologie et l'hydraulique des réseaux d'assainissement.

L'outil MOUSE contient trois modèles de simulation du ruissellement qui sont respectivement, la méthode aire/temps, le modèle du réservoir non linéaire et le modèle du réservoir linéaire. Le modèle du réservoir linéaire de MOUSE est une combinaison de l'équation de continuité avec une équation de vidange linéaire. L'avantage du réservoir linéaire est sa simplicité. En effet, le coefficient d'emménagement est l'unique paramètre à caler. En revanche, le modèle du réservoir linéaire requiert un calage pour être représentatif. De plus, la méthode du réservoir linéaire n'est valable que pour les petits bassins (Pedersen *et al.*, 1980). Par conséquent, un grand bassin doit être discrétisé en plusieurs sous bassins avant d'utiliser le modèle du réservoir linéaire.

L'outil MOUSE TRAP (DHI, 2000b) simule l'accumulation et le lessivage des surfaces perméables et imperméables à l'aide de modèles conceptuels. La masse de particules solides accumulées est dépendante de la durée de temps sec, pour les fines particules de diamètre inférieur à 0,1 mm. En revanche, la masse de particules solides accumulées est supposée infinie pour les grosses particules. Le transport des particules solides par les eaux de ruissellement se fait à l'aide du modèle de réservoir linéaire. Ce modèle simule la charge de particules lessivées à l'aide de la masse de particules accumulées.

L'outil MOUSE utilise des lois hydrauliques semi empiriques pour calculer le débit déversé par les déversoirs d'orage. Ces lois décrivent partiellement les phénomènes hydrauliques au niveau du déversoir. Par conséquent, elles nécessitent un calage de leurs paramètres. En revanche, MOUSE associe les lois de déversement au modèle de laminage en conduite. Par conséquent, l'influence du déversoir d'orage sur l'écoulement dans les conduites situées en amont et en aval du déversoir est pris en compte. De plus, des fonctions linéaires d'abattement de charges simulent la répartition des flux de particules solides au travers des déversoirs.

## 2.8 L'outil InfoWorks

InfoWorks est un outil de simulation hydrologique et hydraulique des réseaux d'assainissement. Il permet d'analyser et de concevoir des réseaux d'assainissement de petite et grande dimension.

Le ruissellement est modélisé à l'aide du modèle de réservoir non linéaire de SWMM ou à l'aide de deux réservoirs linéaires en série. L'outil propose également quatre formules empiriques, adaptées à différents sites géographiques, pour estimer le coefficient d'emmagasinement (Desbordes, 1975).

L'outil InfoWorks simule le lessivage des bassins urbains à l'aide d'un modèle conceptuel dérivé des modèles FLUPOL (Bujon, 1988) et MOSQUITO (Moys *et al.*, 1988). L'accumulation des particules solides sur le bassin est modélisée à l'aide d'un modèle exponentiel identique à celui de SWMM. Le transport des particules solides est simulé à l'aide du modèle de réservoir linéaire. InfoWorks donne de bons résultats sur les bassins urbains de petites dimensions (Blanc *et al.*, 1995). En revanche, le calage du modèle de lessivage nécessite un nombre important de données mesurées.



## 2.9 Conclusion

L'étude bibliographique des outils de simulation hydraulique et hydrologique des bassins urbains fait ressortir plusieurs aspects positifs. Premièrement, la plupart des outils présentés simulent précisément le ruissellement à l'exutoire des bassins urbains. Deuxièmement, ces outils utilisent des modèles de simulation qui ont une formulation robuste. Troisièmement, les outils de simulation sont relativement flexibles. En effet, ils permettent dans la plupart des cas de faire de la simulation événementielle ou en continue. Enfin, les outils de simulation comportent généralement plusieurs modèles de ruissellement. Par conséquent, les outils de simulation compensent le manque de versatilité de chaque modèle en jouant sur leurs complémentarités. En revanche, ces outils présentent plusieurs désavantages dans la perspective d'une utilisation en gestion en temps différé. Premièrement, plusieurs outils décrivent trop en détails les processus du ruissellement. Ces outils sont bien adaptés pour les besoins de la recherche mais inadéquats pour l'ingénieur praticien. De plus, ils réclament la connaissance de paramètres physiques difficiles à mesurer. Deuxièmement, certains outils n'expliquent pas les mécanismes du ruissellement. Par conséquent, l'utilisateur est dans l'impossibilité de réaliser des prévisions. Troisièmement, les outils de simulation utilisent des modèles de lessivage conceptuels comportant de nombreux paramètres. Par conséquent, le calage de ces modèles réclame de nombreuses données mesurées. Enfin, les déversoirs d'orage sont modélisés globalement à l'aide de lois hydrauliques semi empiriques. Or, ces lois s'appliquent uniquement à la minorité des déversoirs d'orage rencontrés dans les réseaux d'assainissement.