



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Faculté de l'Environnement Naturel, Architectural et Construit (ENAC)

Section de Sciences et Ingénierie de l'Environnement (SIE)

Programme de Master en Sciences et Ingénierie de l'Environnement

Laboratoire Hydrologie et Aménagement (HYDRAM)

Rapport de Master

Modélisation de la gestion des eaux de pluie en milieu urbanisé :

**Méthodologie de construction d'un
modèle en vue d'une application avec
le logiciel PCSWMM.net**

Professeur : Dr Marc SOUTTER

Assistant : Xavier BEUCHAT

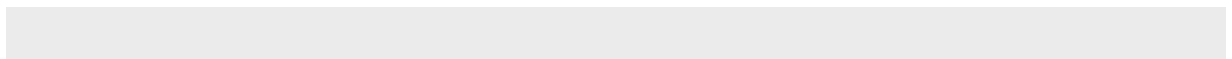
Candidat : Julien BAUD _____

Lausanne, le 18 janvier 2008

Table des matières

Remerciements	5
Résumé	6
1 Introduction	7
1.1 Contexte de l'étude	7
1.2 Objectifs et structure de l'étude	7
2 La modélisation en hydrologie et en hydraulique urbaine	9
2.1 Introduction	9
2.2 Quelques définitions	9
2.3 Classification des modèles	9
2.3.1 Les modèles physiques	10
2.3.2 Les modèles mathématiques	10
2.4 Des processus de modélisation	11
2.4.1 Modélisation hydrologique	11
2.4.2 Modélisation hydraulique - propagation des écoulements	13
2.4.3 Modélisation polluative	13
2.5 Spécificités de l'hydrologie urbaine	14
2.6 Choix du modèle	14
2.7 La mise en œuvre d'un modèle	15
2.7.1 La recherche et préparation des données	15
2.7.2 L'estimation des paramètres (calibration)	16
2.7.3 Validation du modèle.	16
2.7.4 L'exploitation et interprétation	16
3 La modélisation avec PCSWMM	17
3.1 Qu'est ce que SWMM et PCSWMM?	17
3.2 Capacité de PCSWMM	17
3.3 La modélisation dans PCSWMM	18
3.4 Objets conceptuels disponibles dans PCSWMM	19
3.4.1 Objets hydrologiques	19
3.4.2 Objets hydrauliques	20
3.4.3 Objets de gestion qualitative	22
3.5 Synthèse	22
4 Application de PCSWMM pour la gestion des eaux de pluie en milieu urbain	23
4.1 Introduction	23
4.1.1 Présentation des objectifs du modèle	24
4.1.2 Description du concept du modèle	25
4.2 Collecte des données	26

4.2.1	Données de format vectoriel	27
4.2.2	Donnée de format raster (image)	28
4.3	Choix de la zone test de modélisation	29
4.4	Traitement des données	33
4.4.1	Correction de la couche "collecteur"	33
4.4.2	Création du champ <i>altitude</i> pour les couches de type point	34
4.4.3	Traitement des données de type raster	34
4.5	Construction du modèle	35
4.5.1	Simplification du réseau d'assainissement	36
4.5.2	Délimitation des bassins de drainage	38
4.5.3	Détermination des nœuds d'introduction des eaux de ruissellement dans le réseau	41
4.6	Etablissement des paramètres des objets modélisés	42
4.6.1	Les paramètres de l'objet <i>Subcatchment</i>	42
4.6.2	Les paramètres de l'objet <i>Conduit</i>	44
4.6.3	Les paramètres de l'objet Junction Node	44
4.7	Importation dans PCWWMM	45
4.8	Simulation	46
5	Synthèse	48
6	Conclusion	52
7	Bibliographie	53
	Index des figures et des tableaux	54
	Index des figures	54
	Index des tableaux	54
	Annexes	55



Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier Dr Marc Soutter pour m'avoir offert la possibilité d'effectuer ce travail de Master sous sa direction.

Je remercie également Xavier Beuchat pour m'avoir assisté et prodigué de nombreux conseils tout au long de ce travail. Ces apparitions furtives dans le bureau m'ont souvent été d'un apport considérable.

Je remercie également David et Sandra pour la relecture du rapport.

Je souhaite joindre à ces remerciements mes amis et ma copine pour les encouragements qu'ils me donnaient à chaque fois que je me lamentais sur les difficultés que je rencontrais.

Enfin, je remercie tout particulièrement mes parents et mon frère pour le soutien qu'ils m'ont apporté depuis le début de mes études. Ils ont fait preuve de patience durant toute la durée de mon cursus qui fut émaillé de joie et de moments difficiles...

Résumé

Avec l'emprise toujours plus forte de la population humaine sur le milieu naturel ainsi que la densification des centres urbains et de leurs agglomérations, le cycle naturel de l'eau est profondément modifié. L'augmentation des surfaces imperméables diminue le phénomène d'infiltration et augmente les volumes des écoulements superficiels. En conséquence, les risques d'inondations augmentent et des problèmes de capacités des réseaux d'assainissement apparaissent. En vue de mieux maîtriser ces phénomènes de nouveaux principes de gestion sont apparus. Pour appliquer ces principes, des outils de modélisation se sont développés dans le but de diagnostiquer l'état réseaux, gérer les réseaux ou évaluer les impacts d'éventuels nouveaux ouvrages sur les réseaux.

PCSWMM est un de ces logiciels particulièrement bien adapté à la modélisation des processus hydrologiques en milieu urbain. Cependant il est complexe à mettre en œuvre et nécessite une grande quantité de données. Afin de faciliter l'utilisation de ce logiciel, ce travail tente les difficultés de la modélisation et de donner une méthodologie afin d'appliquer PCSWMM dans le cadre d'un objectif bien précis: établir un bilan des rejets des eaux pluviales pour un réseau donné.

Dans le but d'atteindre cet objectif, une application sur une zone test est effectuée, elle illustre la méthodologie de mise en œuvre du modèle et les options qui seront prises durant les démarches de construction du modèle. Les données de la zone test sont tirées du réseau d'assainissement genevois et sont traitées avec un système d'information géographique nommé ArcGIS.

Mots-clés : gestion des eaux de pluie, milieu urbanisé, simulation, modélisation, PSWMM, ArhHydro.

1 Introduction

1.1 Contexte de l'étude

Le cycle de l'eau est profondément modifié par les aménagements urbains. Les compartiments hydrologiques naturels que sont l'atmosphère, les nappes phréatiques, et les hydrosystèmes de surface sont influencés par l'accroissement des principaux compartiments urbains composés des conduites d'eau potable, usée, pluviale, des usines de traitement et des surfaces imperméables.

Par temps de pluie, le phénomène de ruissellement sur les surfaces imperméables, qui est un phénomène de transport important du cycle hydrologique, est augmenté par la croissance des zones urbaines. Une partie de cette eau est captée par le réseau d'eaux usées puis traitée dans les stations d'épuration, une autre est directement évacuée dans le milieu récepteur. Dans certains cas, ce ruissellement provoque une augmentation rapide et conséquente du débit de pointe de crue des cours d'eau. En plus d'augmenter le volume d'eau rejetée dans les hydrosystèmes de surface, la qualité de cette eau est péjorée par le lessivage des polluants accumulés sur les surfaces imperméables par temps sec, ou par le déversement d'eaux usées issus des réseaux saturés dans le milieu naturel.

Les écosystèmes naturels peuvent donc être perturbés et la sécurité de certaines zones urbaines n'est pas toujours garantie en cas d'événements pluviaux intenses. Les risques de crues, de débordement de cours d'eau et d'inondation des zones urbaines situées dans des dépressions deviennent toujours plus fréquents. Il devient donc essentiel de posséder une connaissance très approfondie du fonctionnement des réseaux d'assainissement et des ouvrages de traitement pour les adapter au mieux au développement des agglomérations et aux exigences légales toujours plus strictes en matière de protection de l'environnement. Dans ce but, il est nécessaire de disposer de moyens performants permettant d'apprécier les conséquences d'urbanisation tant d'un sur les aspects quantitatifs, qualitatifs et économique de l'assainissement.

Dans cette optique, la nécessité d'une modélisation globale des réseaux d'assainissement devient évidente. Elle permet en effet le contrôle de l'état d'un système la simulation d'une planification future ou l'évaluation des modifications des aménagements en vue de les améliorer.

1.2 Objectifs et structure de l'étude

Les objectifs de ce travail sont de deux ordres. Tout d'abord le but est de découvrir les principes généraux liés à la modélisation ainsi que les processus intervenant en hydrologie urbaine:

- découvrir les étapes de mise en œuvre d'un modèle ;
- découvrir l'environnement d'un modèle ;
- discerner les processus hydrologiques pouvant intervenir dans un modèle ;
- comprendre les enjeux d'une mise en œuvre d'un modèle.

Puis, dans un second temps, par l'intermédiaire de la construction et l'exploitation d'un modèle, ils sont de découvrir les problématiques pratiques de la mise en œuvre d'un modèle de simulation des eaux de pluie en milieu urbain. Les objectifs y relatifs peuvent s'énoncer de la façon suivante:

- distinguer et trouver quelques solutions aux problèmes de la mise en œuvre du modèle ;
- développez une méthodologie pour le traitement et l'exploitation d'un certain nombre de données pour la construction d'un modèle ;
- appliquer la méthodologie dans cas concret ;
- distinguer l'importance des processus dans le modèle construit ;

Afin d'atteindre ces objectifs, le travail est découpé en trois parties.

Dans un premier temps, des aspects théoriques concernant la modélisation en générale puis la modélisation hydrologique et hydraulique sont décrits. Ces derniers permettront de saisir les processus qui peuvent être simulés dans un modèle.

Dans un second temps, PCSWMM, un logiciel de simulation est brièvement présenté. Les capacités et objets de modélisation du logiciel seront passés en revue. Cette étape a pour but de mettre en relation les processus présentés dans la première phase et les processus qui peuvent être simulés avec PCSWMM.

Enfin, dans un dernier temps, nous présenterons les étapes afin d'obtenir un modèle exploitable avec PCSWMM. L'accent est spécialement porté sur le traitement des données ainsi que la construction du modèle¹. Une présentation de la démarche méthodologique et des outils utilisés pour aboutir à une abstraction de la réalité est effectuée dans le cas d'une application en ville de Genève. La méthode est présentée en parallèle avec l'application afin de mettre en évidence les problématiques rencontrées. Pour terminer la partie application, le modèle est simulé avec l'outil PCSWMM afin de détecter les paramètres les plus influents sur les processus intégrés dans la simulation.

Avant de conclure le travail, une synthèse portera un regard critique sur la méthodologie de construction du modèle et les perspectives d'amélioration.

¹ le terme modèle présente des ambiguïtés car il désigne à la fois l'outil, à savoir le logiciel de modélisation ainsi que la représentation schématique qui contient les systèmes physiques issue de l'abstraction de la réalité. Dans la suite de travail, ce terme se rapportera au schéma de simplification de la réalité. Pour exprimer l'outil, nous utiliserons le nom spécifique de l'outil utilisé, à savoir PCSWMM.

2 La modélisation en hydrologie et en hydraulique urbaine

2.1 Introduction

L'avènement des technologies informatiques a permis de substituer certaines expériences par les simulations numériques. Ainsi, la modélisation est devenue une attitude commune à la recherche scientifique. Elle rejoint les attitudes premières que sont l'expérimentation et l'observation et peut même, dans certains cas, substituer ces dernières non sans induire du même coup quelques difficultés.

Avant de s'intéresser précisément à la notion de modélisation dans le domaine de l'hydrologie et de l'hydraulique urbaine, il est intéressant de définir quelques éléments liés à la notion de modèle.

2.2 Quelques définitions

Venant du latin « *modulus* », le mot modèle est défini par le Grand Larousse comme « ce qui vous est donné pour servir de référence ». Cependant, tout au long de l'histoire, ce mot recouvre des notions suivant son domaine d'application et les convictions philosophiques des utilisateurs.

Pour l'Encyclopédie Universalis, l'origine du mot est technologique. Le modèle est d'abord une maquette qui représente d'une façon simplifiée, miniaturisée les propriétés d'un objet. C'est ce qu'on appelle aujourd'hui un modèle réduit. À l'opposé, selon la conception platonicienne, le modèle est considéré comme une forme idéale sur laquelle les existences sont réglées. Il est donc pris comme un support conceptuel, un guide de pensées.

Ainsi nous constatons que la notion de modèle nécessite implicitement toute une série de choix concernant le formalisme de la représentation et le support de l'imitation. Le modèle n'est donc ni neutre ni objectif.

Il revient tout de même d'accepter qu'une situation difficile à représenter constitue le point de départ d'une simplification de la réalité en vue de simuler un phénomène. La modélisation découle d'une volonté de représenter de manière plus ou moins simple une réalité trop complexe. Elle peut donc être définie comme une représentation schématique d'un phénomène physique réalisé dans le but de l'étudier.

2.3 Classification des modèles

Outre les différentes définitions obtenues en fonction du point de vue du modélisateur, il est également possible de les classer par types d'approche [Musy A] et [Chocat B]. Ces approches ne sont pas exclusives les unes des autres et peuvent même être complémentaires.

2.3.1 Les modèles physiques

Dans ce cas, le modèle devient une maquette reproduite à une échelle spécifique. La principale difficulté revient à transposer le résultat dans la réalité par rapport au facteur d'échelle. Il est souvent impossible d'éviter des distorsions dans les phénomènes. Il devient donc nécessaire de négliger certains aspects. Par exemple, les forces de viscosité sont négligées si les forces de gravité dominent. On parle alors de similitude de Froude. Si au contraire, les forces de gravité peuvent être négligées au profit des forces de viscosité, on parle de similitude de Reynolds.

2.3.2 Les modèles mathématiques

Dans ce cas, le modèle représente sous forme d'équations les phénomènes physiques de la réalité. Il se compose d'une ou plusieurs équations dont l'origine, le degré de complexité et le réalisme multiplient les possibilités de construction. Ainsi, il est possible de distinguer :

▪ Les modèles empiriques

Ils sont représentés par des formules et équation simples et empiriques. Par exemple, la formule rationnelle qui permet de déterminer le débit de pointe en fonction d'information minimale du bassin versant, à savoir le coefficient de ruissellement.

Les inconvénients de ces modèles sont divers. Parfois, les coefficients locaux interviennent et ne sont pas transposables directement. Il n'y a pas de moyens de contrôle de l'ordre de grandeur et il n'est pas possible de rattacher d'autres processus (par exemple un bilan pollutif ou le transport solide aux crues calculées).

▪ Les modèles statistiques

Ils utilisent des fonctions de distribution (loi Normale, de Gumbel) afin d'évaluer ou de prédire un comportement observé. Ces méthodes analysent les variables en tant qu'échantillon d'une population statistique dans le but d'une régionalisation ou en vue de la prédiction de certaines grandeurs. En hydrologie, la variable la plus utilisée est le débit à l'exutoire d'un bassin versant, et notamment le débit maximum et minimum journalier, mensuel ou annuel.

L'expérience indique que les valeurs moyennes d'un comportement sont représentées correctement par la loi Normale, et que les valeurs maximums et minimums sont mieux approchées par une loi de type « extrême » telle que la loi de Gumbel.

Les principales faiblesses de ces modèles sont :

- Estimation d'une valeur caractéristique seulement ;
- Non prise en compte de nombreux paramètres ;
- Impossibilité de rattacher d'autres processus ;
- Résultats dépendent des données ;
- Difficulté de calculer les erreurs de simulation.

▪ Les modèles conceptuels

Ces modèles tentent de reproduire la réponse d'un bassin versant en remplaçant la réalité de l'écoulement par une idéalisation fort simplifiée de la géométrie du bassin

versant et de l'écoulement par rapport à la situation réelle. En hydrologie, les deux concepts de modélisation principalement utilisés sont :

- la représentation de la géométrie des surfaces d'écoulement par des plans rectangulaires de pentes constantes ;
- la représentation de l'écoulement par des réservoirs fictifs.

▪ **Les modèles mécanistes (ou à base physique)**

Ils résolvent des systèmes d'équations de quantité de mouvement et de continuité liés au transport d'eau, de substance ou d'énergie. Ils décrivent mathématiquement les phénomènes rencontrés. A titre d'exemple, l'équation de Barré St-Venant pour les écoulements en surface libre ou de Darcy-Richards pour les écoulements souterrains. De tels modèles nécessitent une description détaillée du bassin versant, des schémas numériques robustes et la détermination de paramètres physiques (paramètre de friction, conductivité hydraulique etc.), ces derniers pouvant être mesurés in situ. Cependant l'utilisation rigoureuse des paramètres réels ne permet pas d'éviter des distorsions des modèles. En effet, des simplifications inévitables impliquent que certains processus ne sont pas simulés correctement. Ainsi, les paramètres réels du modèle doivent intégrer une erreur, une information sur les paramètres non pris en compte, si le modèle est calé. Il en découle qu'un modèle à base physique donne des réponses très proches des observations avec des paramètres physiques différents de ceux mesurés.

Les inconvénients de ces modèles sont la mise en œuvre fastidieuse, la détermination des paramètres et leur coût.

2.4 Des processus de modélisation

La modélisation hydrologique étudie principalement la réaction d'un ensemble de bassins versants et d'un réseau à un événement pluviométrique. Ses buts sont divers et permettent soit d'évaluer l'état d'un système ou de procéder à des calculs de dimensionnement, soit d'étudier les perspectives de développement ou de correction du système.

Pour ce faire, il faut plus que la seule connaissance du débit de pointe obtenu par la méthode rationnelle pour déterminer les volumes d'eau de ruissellement. Il est utile de connaître les hydrogrammes de ruissellement aux différents points névralgiques des réseaux et bassins de drainage.

Les processus pris en compte varient suivant les modèles. Mais pour être les plus représentatifs de la réalité, les phénomènes suivant doivent être intégrés. Ils peuvent être séparés dans trois catégories différentes : la modélisation hydrologique, la modélisation hydraulique, la modélisation polluative.

2.4.1 Modélisation hydrologique

Elle est relative aux processus que l'on retrouve dans le cycle de l'eau. Parmi ces mécanismes, nous citerons :

▪ **L'évapotranspiration**

Ce terme englobe l'évaporation et la transpiration des végétaux. Il s'agit de la transformation de la phase vapeur à la phase liquide. Les plans d'eau et la couverture végétale sont les principales sources de ce phénomène. Ils dépendent essentiellement

de deux facteurs, la quantité de chaleur à disposition et la capacité de l'air à stocker de pour la transpiration. Le premier facteur provient de l'énergie fournie par le soleil et varie essentiellement selon le gradient de la latitude et de l'altitude. Le second facteur peut s'exprimer par la notion d'humidité relative qui est le rapport de la quantité d'eau contenue dans une masse d'air et la quantité maximale d'eau que peut contenir cette masse d'air. Alors que la transpiration est surtout conditionnée par les conditions climatiques, les conditions liées aux sols et le type de végétation.

▪ **L'interception et le stockage dans les dépressions**

L'interception se définit comme la fraction d'eau qui est interceptée par le couvert végétal mais aussi les surfaces plus ou moins perméables comme les constructions ou les routes (surfaces à ne pas négliger en hydrologie urbaine). Ce phénomène étant étroitement relié à l'évapotranspiration, ce sont surtout les facteurs météorologiques (notamment la durée et l'intensité de la pluie) et le type de couverture du sol qui vont influencer la quantité d'eau interceptée.

Le stockage dans les dépressions comprend l'eau emmagasinée dans les creux jusqu'à leur déversement.

▪ **L'infiltration**

L'estimation de l'importance des processus d'infiltration va permettre d'estimer quelle fraction va alimenter l'écoulement souterrain et l'écoulement de surface.

L'infiltration se définit comme le transfert de l'eau à travers les couches superficielles du sol lorsque celui-ci reçoit des précipitations. Tout d'abord, l'eau d'infiltration remplit les interstices en surface du sol puis pénètre dans celui-ci sous l'effet des forces de gravitation et des forces de succion. Elle est influencée par les facteurs suivant : le type de sol, la compaction de la surface du sol, la couverture du sol, la topographie, la morphologie, le débit d'alimentation et la teneur en eau initiale du sol.

Différentes relations mathématiques expriment le flux d'eau que le sol est capable d'absorber à travers le temps. Cette notion est déterminée par la « capacité d'infiltration » d'un sol. Deux approches permettent de la déterminer. Une approche à base physique qui s'appuie sur la loi de Darcy et que définit le modèle de Green et Ampt. Une approche empirique qui est définie par la formule de Horton.

▪ **Les écoulements**

De par la diversité de ses formes les hydrologues distinguent plusieurs types d'écoulement. Quatre chemins principaux vont guider la goutte d'eau jusqu'à la rivière ou l'exutoire du bassin versant :

Précipitation directe

Fraction de pluie qui tombe directement à la surface libre du cours d'eau pour atteindre l'exutoire du bassin versant. Cette contribution est peu influente dans les phénomènes de crues puisque la surface des cours d'eau est faible en rapport des surfaces des bassins versants.

Écoulement de surface ou ruissellement

Fraction de l'eau qui s'écoule plus ou moins librement à la surface des sols pendant les précipitations. Il existe deux causes à l'origine de ce processus. Le ruissellement se produit lorsque la capacité d'infiltration est dépassée ou lorsqu'elle se produit sur un sol déjà saturé en eau.

Écoulement de subsurface (ou hypodermique)

Il comprend la contribution des horizons de surface totalement ou partiellement saturés en eau. Ces écoulements sont plus lents que le ruissellement mais plus rapide que les écoulements souterrains. On peut également les traduire par « écoulement rapide interne ». Les hydrologues distinguent quatre causes à ces écoulements : l'effet piston, l'écoulement par macropores, intumescence de nappe et l'écoulement de retour. Signalons que pour que ce type d'écoulement apparaisse, il est nécessaire que la conductivité hydraulique latérale soit nettement supérieure à la conductivité verticale.

Écoulement souterrain

Il représente la part d'eau infiltrée qui transite lentement vers l'exutoire à travers l'aquifère. Les vitesses d'écoulement varient de quelques millimètres quelques mètres par jour. Ce type d'écoulement joue un rôle essentiel dans les débits de base des cours d'eau.

2.4.2 Modélisation hydraulique - propagation des écoulements

La propagation des hydrogrammes dans les conduites est d'une importance considérable dans un réseau. La variabilité des types d'écoulements est due à quatre causes principales : le réseau qui est caractérisé par de très nombreux changements de pentes, de type de section et par une grande quantité de tronçons ; de la forme des sections ; des débits qui sont la conséquence des événements pluviométriques ; et enfin du type d'écoulement qui peut être en charge ou à surface libre, et varié très vite de l'un à l'autre.

La propagation d'un écoulement dans une conduite est un phénomène physique. Elle peut être décrite par des équations de la mécanique des fluides connues sous le nom des équations de Saint-Venant. Elles constituent en fait un système d'équations fondées sur l'équation de continuité et l'équation de la conservation d'énergie.

En formulant certaines hypothèses, il est possible de classer les types de solutions des équations de Saint-Venant en différents types d'ondes. On parle d'onde dynamique pour un écoulement non uniforme et non permanent, et d'onde cinématique pour un écoulement uniforme et permanent. Cette dernière constitue l'expression la plus simple des équations de Saint-Venant.

2.4.3 Modélisation pollutive

La modélisation de l'aspect qualitatif des réseaux d'assainissement doit intervenir dans la conception des réseaux et dans la gestion des ouvrages en place. En général, les modèles intégrant la gestion qualitative, sont des modèles classiques auxquels un bloc de calcul de la pollution a été ajouté. Les phénomènes de fluctuation de la qualité des eaux qui sont intégrés dans ces blocs sont :

- l'accumulation de la pollution dans le réseau et sur le sol au cours du temps ;
- le lessivage de cette pollution par la pluie ;
- le transport des polluants dans le réseau et cours d'eau.

Les approches permettant la représentation de ces phénomènes peuvent être d'origine statistique, conceptuelle ou déterministe. Cette dernière approche tente d'établir des

relations univoques entre les variables d'entrée qui caractérisent les apports polluants et les variables de sortie traduisent l'accumulation des polluants dans les réseaux d'assainissement. Elle tend à décrire les équations de la mécanique, de l'hydraulique, de la biologie et de la chimie, soit l'ensemble des phénomènes qui sont liés aux polluants. Ainsi, ces modèles contiennent les fonctions d'accumulation et de mobilisation des polluants et le transport en réseau est représenté par une fonction de transfert des polluants.

▪ **Modèle d'accumulation**

Il permet de déterminer la masse de polluants présente sur la surface drainée et qui pourra être disponible et entraînée par la lame ruisselante. L'accumulation est généralement modélisée dans les logiciels par une fonction linéaire, exponentielle ou de Michaelis-Menten.

▪ **Modèle de lessivage**

L'entraînement de la masse accumulée au cours d'un événement varie en fonction des caractéristiques de l'événement pluviométrique, de la topographie du bassin versant (surface, pente, etc.) ainsi que les caractéristiques des sédiments.

2.5 Spécificités de l'hydrologie urbaine

L'hydrologie urbaine a pour objet d'étude l'eau et les relations de l'eau avec les différentes activités humaines en zone urbaine. Elle traite tout particulièrement des relations entre la gestion des eaux de surface et l'aménagement de l'espace en milieu urbain [Chocat B].

L'urbanisation affecte profondément le cycle naturel de l'eau. Ainsi l'infiltration de l'eau dans les sols, le fonctionnement de nappes, le ruissellement des eaux en surface, les écoulements dans les cours d'eau ou les conduites souterraines sont profondément touchés par l'urbanisation. Inversement, l'eau peut perturber les zones urbaines de par les risques d'inondations qui présentent des enjeux financiers, environnementaux et sociaux importants.

Les particularités des bassins en milieu urbains sont:

- la faible dimension des bassins versants;
- la forte imperméabilisation des sols qui modifient le ruissellement tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif;
- le réseau hydrographique est artificialisé, le ruissellement naturel est forcé à emprunter le réseau d'évacuation;
- l'évolution rapide en fonction de l'accroissement urbain;
- ils sont sujet au risque d'inondation;

2.6 Choix du modèle

La grande diversité des modèles hydrologiques complique le choix des scientifiques et ingénieurs pour une application donnée. Afin d'éviter certaines erreurs et de réduire certains inconvénients, il est nécessaire d'effectuer le choix en fonction des objectifs de l'étude.

Cependant, il n'est pas toujours évident de satisfaire à cette règle. Des problèmes de coûts, licence d'utilisation, matériel nécessaire pour le fonctionnement ou d'habitude de travail ont tendance à prendre le dessus sur le critère rationnel qui tend à chercher la meilleure adéquation entre le modèle et la problématique à étudier.

Il peut alors être intéressant de se fixer quelques critères afin de faciliter le choix :

- La possibilité de déterminer les paramètres.
- Les possibilités de simulation : Il est fréquent de devoir faire des analyses de sensibilité sur des paramètres. Cela nécessite une utilisation répétée du modèle. Certains modèles offrent alors la possibilité de fonctionner automatiquement de façon itérative.
- La facilité d'utilisation : Certains modèles ont des interfaces peu conviviales, nécessitent une préparation des données fastidieuses ou ont des fichiers de sorties difficiles à exploiter. Il est donc conseillé d'utiliser des programmes récents qui facilitent l'utilisation et la compréhension des phénomènes. Il ne faudrait pas utiliser de modèles dont les modules ne sont pas entièrement compris et maîtrisés.
- Le coût du modèle et l'équipement qu'il nécessite peut également influencer le choix de l'utilisateur. Il doit être comparé en fonction du coût de l'étude à réaliser.

En complément à ces critères il convient d'intégrer la notion de simplicité. Il est important d'envisager le modèle le plus simple possible pour une étude, sans tomber dans les excès de simplicité non plus. Einstein avait formulé ce critère de la façon suivante [Musy A] :

« **Un modèle doit être aussi simple que possible, mais pas plus simple.** »

Tous ces critères ne sont pas exhaustifs, mais doivent nous rendre attentif au fait qu'il n'est pas aisé de choisir un modèle.

2.7 La mise en œuvre d'un modèle

D'une façon optimale, la mise en place d'un modèle nécessite un travail complexe qui peut être séparé en quatre étapes : la recherche et préparation des données, l'estimation des paramètres (étape également nommée calage ou calibration), la validation et enfin l'exploitation du modèle.

2.7.1 La recherche et préparation des données

Cette étape nécessite de bien connaître le fonctionnement du logiciel de modélisation afin de déterminer toutes les données qui seront nécessaires à l'élaboration du modèle. Il est possible de se procurer les données de différentes manières. Il est parfois nécessaire d'effectuer des campagnes de mesures sur le terrain. Ce procédé requiert des moyens conséquents. Outre le fait de posséder une certaine quantité d'appareils performants et souvent coûteux, il faut disposer d'une main-d'œuvre qualifiée pour la mise en place d'une telle campagne. Pour certaines variables la durée des mesures qui peut atteindre plusieurs mois peut engendrer des problèmes dans le respect des délais. Il y a aussi la possibilité de s'adresser aux autorités ou à certains offices qui disposent de données d'études antérieures. Mais elles ne seront pas forcément toujours à jour.

Une fois les données obtenues, elles nécessiteront parfois un traitement primaire afin d'en extraire les variables qui sont spécifiquement utilisées par le modèle ainsi que pour éliminer

toutes les erreurs (erreur de mesure, erreur de saisie, erreur d'acquisition, etc.) qui ont pu être effectuées durant la détermination des valeurs des paramètres.

2.7.2 L'estimation des paramètres (calibration)

Le calage d'un modèle consiste à estimer ses paramètres inconnus de façon à obtenir des réponses qui soient aussi proches que possible des observations. En générale, cette étape permet de modifier les paramètres hydrologiques, les paramètres hydrauliques étant estimés avec plus de certitude, sachant que les informations sur les réseaux sont plus détaillées. Les valeurs ainsi estimées permettent par la suite de simuler des événements qui n'ont pas servis au calage ou des événements hypothétiques futurs.

Les théories des méthodes d'estimation des paramètres sont nombreuses et relèvent surtout d'un aspect particulier des mathématiques à savoir la statistique.

2.7.3 Validation du modèle.

Cette étape a pour objectifs de déterminer l'adéquation du modèle avec des événements connus et l'estimation de l'erreur à craindre en simulation. La validation du modèle nécessite donc des simulations avec des événements qui n'ont pas servis au calage.

2.7.4 L'exploitation et interprétation

Les étapes précédentes occupent une grande partie du travail des scientifiques. Si elles ont pu être réalisées, il reste aux utilisateurs d'exploiter le modèle pour les études désirées. La principale difficulté restant avant l'exploitation du modèle réside dans le choix des valeurs d'entrée, conditions initiales et conditions aux limites. Les simulations effectuées, il faut alors se garder de ne pas tirer des extrapolations trop importantes des résultats, de ne pas oublier d'intégrer les erreurs calculées lors de la validation aux valeurs obtenues et dans la mesure du possible comparer les résultats avec d'autres études.

3 La modélisation avec PCSWMM

3.1 Qu'est ce que SWMM et PCSWMM?

SWMM (Storm Water Management Model) est un programme de simulation hydrologique développé par l'agence de la protection de l'environnement aux Etats-Unis (USEPA) en collaboration avec un groupe de recherche situé à l'université de Floride et à l'université de l'état d'Oregon. Depuis son premier développement en 1971, ce modèle a suivi des évolutions successives et en est actuellement à sa cinquième version.

Ce programme permet la simulation du comportement des eaux pluviales tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif. Il est particulièrement bien adapté au bassin urbain pour le calcul des réseaux d'assainissement simples ou complexes et s'applique soit pour des événements ponctuels ou pour des simulations continues.

En rapport avec la classification présentée dans le chapitre précédent, SWMM fait partie de modèle mathématique. Plus précisément, c'est un modèle à base physique qui transforme les précipitations en écoulement en utilisant une méthode de réservoirs non-linéaires, les pertes par infiltration étant estimées par l'équation de Horton ou celle de Green-Ampt. L'écoulement est transporté dans des conduites ou chenaux prédéfinis sur la base des équations de St-Venant.

Le logiciel PCSWMM² est fondé sur le modèle de calcul SWMM 5. Il y intègre une interface de système d'information géographique (SIG) simplifiée. Il permet ainsi d'importer et de traiter d'une façon aisée les fichiers de logiciels SIG régulièrement utilisés par les collectivités pour maintenir à jour les données de leur réseau. De plus amples informations ainsi que les conditions de commandes de PCSWMM et SWMM sont disponible sur le site <http://www.computationalhydraulics.com>.

3.2 Capacité de PCSWMM

PCSWMM intègre une grande quantité de processus hydrologiques afin de simuler le ruissellement du bassin urbain :

- pluie variable dans le temps ;
- évaporation des surfaces d'eau ;
- accumulation et fonte des neiges ;
- interception et stockage dans les dépressions ;
- infiltration dans le sol non saturé ;
- percolation et écoulement souterrain ;
- échange entre les eaux souterraines et le système de drainage ;
- transport par réservoir non-linéaires de l'écoulement.

² Durant ce travail de Master, la version de PCSWMM utilisée est la version PCSWMM.net

Il dispose également d'une palette variée de fonctions hydrauliques afin de transférer les débits à travers un réseau d'assainissement de conduite, chenaux, unité de traitement, de stockage et ouvrage de diversion. Ainsi, SWMM permet :

- de manipuler des réseaux de taille illimitée ;
- d'utiliser une grande variété de conduite à section standard ainsi que des canaux naturels ;
- de modéliser des ouvrages hydrauliques tels que des unités de rétention/traitement, des pompes, des ouvrages de diversions, des déversoirs et des orifices ;
- d'utiliser l'onde cinématique ou l'onde dynamique comme méthode de routage ;
- d'appliquer des écoulements externes tels que des débits d'eaux usées par temps sec ;
- de simuler le fonctionnement des pompes, orifices et déversoirs en fonction de lois définies par l'utilisateur.

En complément à la modélisation de la production et du transport de l'écoulement, PCSWMM simule les phénomènes liés à l'évolution des charges polluantes, à savoir :

- accumulation du polluant en fonctions du type d'utilisation du sol ;
- contribution directe de la déposition due à la pluie ;
- réduction de l'accumulation par temps sec conséquent au nettoyage des routes ;
- réduction du lessivage conséquent aux ouvrages de gestion alternatifs ;
- lessivage spécifique à chaque type d'utilisation du sol ;
- ajout de débit d'eau usée par temps secs.

3.3 La modélisation dans PCSWMM

Dans SWMM, la réalité est simplifiée à l'aide de quatre compartiments entre lesquels il simule les échanges et transferts.

- **Le compartiment « atmosphérique »**

Compartiment qui contient les données des précipitations qui vont tomber dans le compartiment surface de terrain.

- **Le compartiment « surface de terrain »**

Il est représenté par un ou plusieurs bassins de drainage qui reçoivent les précipitations du compartiment atmosphérique sous forme de pluie ou de neige. Ces précipitations sont alors infiltrées dans le sous-sol ou transformées en ruissellement introduit dans le compartiment transport.

- **Le compartiment « souterrain »**

Il reçoit les infiltrations et transfère une partie de ses écoulements dans le compartiment transport.

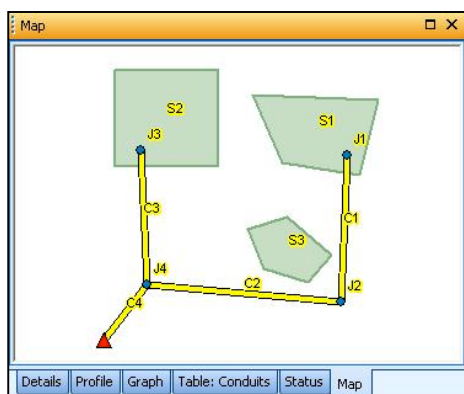
▪ Le compartiment « transport »

Il est représenté par un réseau d'élément de transport (canaux, conduites, pompes, etc.) et d'unité de stockage/traitement. Les apports proviennent du ruissellement du compartiment « Surface de terrain », des écoulements du compartiment « Souterrain », et d'hydrographes définis par l'utilisateur (eaux usées par temps sec par exemple).

Tous ces compartiments sont construits avec l'aide d'une palette d'objets disponibles dans SWMM. Ces objets sont caractérisés par des paramètres (surface, pourcentage imperméable, pente rugosité géométrie de la canalisation, etc.) qui vont permettre de représenter au mieux le bassin hydrologique modélisé.

3.4 Objets conceptuels disponibles dans PCSWMM

Dans la partie suivante, chacun des objets sont brièvement présentés. Le schéma de la Figure 1 illustre la façon dont ces objets peuvent être arrangés dans l'interface graphique de SWMM.



Ils sont classifiables dans trois classes en fonctions du domaine de la réalité qu'ils vont pouvoir représenter. Ainsi, une première classe d'objets permettra de reproduire les processus relatifs à l'hydrologie, une seconde classe d'objets permettra de représenter les processus hydrauliques et enfin une troisième classe permet de gérer la simulation de la mobilisation et transport des polluants.

Figure 1 Illustration de l'interface graphique avec un modèle composé de 3 bassins de drainage S, 4 conduites C et 4 nœuds de jonction J

3.4.1 Objets hydrologiques

▪ Pluie (*Rain Gages*)

Cet objet contient les données de précipitation qui sont, soit définie par l'utilisateur, soit tirée d'un fichier externe. Elles peuvent être introduites sous forme d'intensité, de volume ou de volume cumulé.

▪ Bassin de Captage (*Subcatchment*)

Le bassin de captage est l'objet qui représente les compartiments « surface de terrain » et « souterrain ». Il correspond en fait à l'unité hydrologique qui va recevoir la pluie et la transformer en écoulement de surface et écoulement souterrain.

Il peut être divisé en deux parties composées de surface imperméable et perméable. Les paramètres principaux de cet objet sont : la topographie du bassin, le taux d'imperméabilité, la pente, le type d'utilisation du sol, la rugosité.

▪ Aquifère (*Aquifers*)

Comme son nom l'indique, cet objet va permettre de simuler les échanges se déroulant dans le sous-sol du modèle. Il intègre les mouvements verticaux conséquents de l'infiltration des eaux de l'objet "Bassin de captage" et les mouvements horizontaux en direction d'un point de sortie ou d'un réseau de drainage par exemple. Un même aquifère peut être partagé avec plusieurs bassin de captage.

Le comportement de l'aquifère est caractérisé par les paramètres suivants : porosité, conductivité hydraulique, capacité de rétention, profondeur d'évapotranspiration.

▪ **Module Neige (Snow Pack)**

Cet objet contient les paramètres afin de caractériser l'accumulation, l'évacuation et la fonte des précipitations sous forme de neige à l'intérieur d'un bassin de captage. Il permet de définir trois zones :

- région imperméable ou la neige est évacuée mécaniquement ;
- région imperméable ou la neige n'est pas évacuée ;
- région perméable ou la neige n'est pas évacuée.

Dans cet objet il est possible de définir les coefficients de fonte neige, la température minimum pour la fonte, la hauteur de neige initiale, et les conditions d'évacuations mécaniques de la neige.

▪ **Climat**

Cet objet permet de déterminer les paramètres relatifs à la météorologie. Plus précisément il permet d'intégrer les séries de température afin PCSWM puisse simuler le processus d'évaporation et de fonte des neige.

3.4.2 Objets hydrauliques

Il existe deux types d'objets hydrauliques : les nœuds (*node*) et les liens (*link*). Il est nécessaire d'insérer un nœud à l'amont et à l'aval de chaque lien. Outre leurs fonctions propres, les différents nœuds permettent de définir les paramètres topographiques des liens qui leurs sont associés.

▪ **Les nœuds**

Les nœuds se comptent au nombre de quatre :

Nœud de jonction (*Junction Nodes*)

Les nœuds de jonction sont des points permettant créer des liens entre différents objets. En réalité ils peuvent représenter la confluence de deux canaux ou un regard dans un réseau d'assainissement.

Signalons que si la capacité de la conduite ne permet pas le transit de tout le flux, le débit en excès peut-être stocké temporairement et réintroduit dans le réseau lorsque la conduite n'est plus surchargée.

Le paramètre principal de cet objet est l'altitude (*invert Elevation*).

Nœud de chute (*Outfall Nodes*)

Ce sont les objets constituant les points finaux situés en aval du réseau. Ils permettent de définir les conditions limites de l'écoulement lorsque la méthode de résolution utilise le modèle de l'onde cinématique.

Nœud de diversion de l'écoulement (*Flow Divider Nodes*)

Ce sont les nœuds qui permettent de séparer un écoulement en deux. La séparation peut se faire de différentes manières :

- *cutoff divider* : détourne les débits supérieurs à une valeur définie ;
- *overflow divider* : détourne les débits lorsque la capacité de la conduite est atteinte ;
- *Tabular divider* : le débit détourné est fonction du débit entrant ;
- *Weir Divider* : utilisation d'une équation de type « déversoir ».

Unité de Rétention (*Storage Units*)

Ces objets vont permettre de définir des volumes de rétentions. Ils seront décrits par une fonction prédéfinie ou des tables déterminant la surface en fonction de la hauteur. En réalité, ces unités peuvent représenter un simple bassin de rétention aussi bien qu'un lac.

- **Les liens**

Les liens sont caractérisés par cinq objets différents :

Conduites (*Conduits*)

Ils représentent les tuyaux ou canaux dans lesquels les eaux vont s'écouler d'un nœud à un autre. Leur section transversale peut être sélectionnée dans une liste de section standard ou définie par l'utilisateur.

Les principaux paramètres nécessaires aux conduites sont : la longueur, la rugosité, l'élévation par rapport au point bas du nœud amont et aval, ainsi que la géométrie de la section transversale.

Pompes (*Pumps*)

Les pompes ont pour but de relever les eaux.

Les régulateurs d'écoulement (*Orifice, Weir, Outlet Flow*)

Ce sont des structures ou artifices qui ont pour fonctions de contrôler ou détourner les écoulements. Ils sont typiquement utilisés pour :

- contrôler les écoulements dans les systèmes de rétention ;
- prévenir les risques de surcharge du système ;
- détourner les eaux dans les différents systèmes de traitements.

SWMMM dispose de trois types de régulateurs. L'objet Orifice (*Orifice*), qui correspond à une ouverture dans un mur et dont l'écoulement est simulé par une fonction prédéfinie. L'objet Déversoir (*Weir*) qui permet de modéliser les déversoirs à section rectangulaire, triangulaire ou trapézoïdale. Enfin, l'objet exutoire (*Outlet*) permet de contrôler l'écoulement à la sortie d'un ouvrage de rétention en définissant une courbe de débit de refoulement en fonction de la charge.

3.4.3 Objets de gestion qualitative

L'analyse de l'aspect qualitatif du réseau nécessite la modélisation de trois phénomènes qui sont derrière les fluctuations de la qualité des eaux :

- l'accumulation de la pollution sur le sol et dans durant le temps sec ;
- le lessivage de cette pollution durant les pluies ;
- le transport de polluants dans le réseau.

Les paramètres de ces phénomènes sont définis avec l'aide de deux objets dans PCSWMM :

- **Polluants (*Pollutants*)**

Cet objet permet d'éditer les informations de base des polluants dont PCSWMM va effectuer la modélisation. Les informations telles que le type de polluant, l'unité de concentration, la concentration du polluant dans les précipitations et dans les eaux souterraines, ainsi que le coefficient d'érosion.

- **Utilisation du sol (*Land Uses*)**

Cet objet va permettre d'introduire différents types d'utilisation du sol. Pour chacune de ces utilisations, différents modèles d'accumulation et de mobilisation des polluants vont être définis. SWMM propose de simuler le taux d'accumulation des polluants selon quatre modèles qui sont fonction de la durée de temps sec : modèle linéaire, méthode puissance, méthode exponentielle et méthode Michaelis-Menten.

Le lessivage des polluants est quand à lui estimé, soit en fonction de l'intensité de la pluie et d'un coefficient d'arrachement, soit en fonction de l'intensité de la pluie et de la masse disponible ou selon une fonction exponentielle.

Afin de réduire l'accumulation de polluants, cet objet permet également d'introduire un nettoyage mécanique des routes. Pour cette fonction, les paramètres suivant doivent être définis : nombre de jours entre chaque nettoyage, fraction de polluant qui peut être enlevée par le nettoyage, efficacité du nettoyage.

3.5 Synthèse

L'intérêt de PCSWMM réside dans sa capacité à reproduire les ouvrages hydrauliques et par conséquent d'être un logiciel adapté à la modélisation en milieu urbain. Pour les objets qui sont insérés dans le modèle, il peut notamment déterminer les hydrogrammes, les vitesses d'écoulement, les hauteurs d'eau et effectue automatiquement un bilan des processus intervenant dans la modélisation. Cependant, c'est un logiciel très complexe qui nécessite un temps d'approche considérable. De plus, le fait de pouvoir simuler un grand nombre de processus fait intervenir de nombreux paramètres. Par conséquent, les données sont également très nombreuses à acquérir. Ceci représente un obstacle supplémentaire à la modélisation en soi. Il n'est pas toujours évident de trouver les données concernant le réseau d'assainissement.

4 Application de PCSWMM pour la gestion des eaux de pluie en milieu urbain

4.1 Introduction

Suite à une présentation générale des principes de modélisation et du logiciel PCSWMM, nous allons présenter une méthode afin d'appliquer PCSWMM pour la gestion des eaux de pluie en milieu urbain.

En conséquence des considérations traitées dans les chapitres précédents, la méthodologie de mise en œuvre d'un modèle passe par les étapes présentées dans la figure suivante (Figure 2):

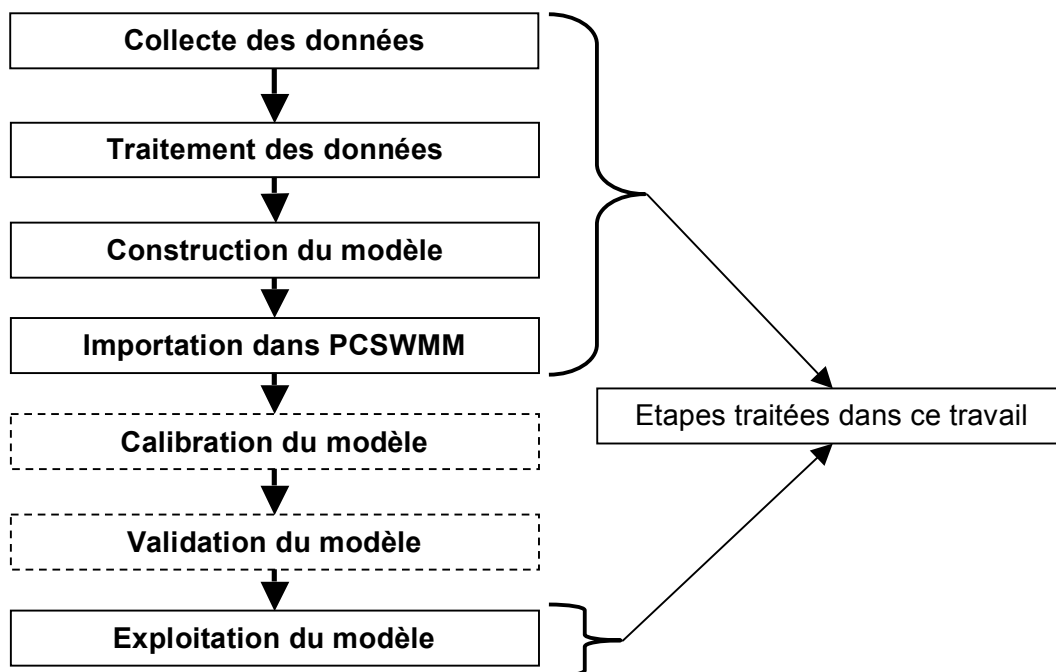


Figure 2 Etapes de mise en œuvre du modèle

Pour chacune de ces étapes une démarche est proposée pour traiter et exploiter les données relatives à une zone d'étude établie dans le but de l'appliquer avec le logiciel de simulation hydrologique PCSWMM.

Etant donné qu'aucune simulation réelle n'est pratiquée, l'objectif de ce travail n'étant pas d'évaluer ou d'étudier les risques, problèmes ou potentiels de la gestion des eaux de pluie pour une zone, les étapes de calibration et de validation ne seront pas traitées. L'accent est donc spécialement porté sur les quatre premières étapes du schéma ci-dessus. Les hypothèses et les démarches en vue des les concrétisé sont présentées. Dans un dernier temps, quelques simulations sont effectuées afin de chercher les paramètres les plus influents du modèle.

Afin d'illustrer la méthodologie appliquée, les données sont tirées du réseau d'assainissement de Genève. Cette ville est choisie car une base de données très complète des informations territoriales y est disponible. Une zone test au cœur de la ville va servir de base d'illustration pour les étapes de mise en œuvre du modèle.

Deux logiciels sont utilisés dans les différentes étapes de cette application. En complément au logiciel de modélisation PCSWMM, le programme de Système d'Information Géographique (SIG) ArcGIS 9.2³ est utilisé. Il va permettre de traiter les données avant de les importer dans PCSWMM. Ce programme SIG possède également l'avantage de disposer d'applications spécifiques à l'hydrologie, notamment pour partager une surface en bassins versants et sous bassins versants. Cette application nommée ArcHydro⁴ est utilisée pour la délimitation des bassins de drainage du réseau d'assainissement d'eaux pluviales.

4.1.1 Présentation des objectifs du modèle

Les capacités de PCSWMM étant élevées, et les processus de modélisation hydrologiques étant nombreux, il est primordial de se fixer des objectifs de modélisation. Il n'est pas judicieux d'envisager d'intégrer tous les processus intervenant en hydrologie. En effet, cela complique énormément la construction du modèle, nécessite une quantité de données astronomiques (données qui ne sont parfois même pas disponibles) et rend plus difficile l'interprétation des résultats (si il y a trop de processus, il devient plus de distinguer les paramètres essentiels pour chacun d'eux). En effet, certains processus peuvent prendre le dessus sur les processus que l'on souhaite étudier. Du coup, les nuances des résultats des processus masqués sont moins accessibles.

Pour ces raisons, il est nécessaire de cibler les processus que l'on souhaite modéliser, déterminer la surface et la zone qui servira de base et définit la résolution⁵ du modèle en fonction des objectifs de simulations.

L'objectif de simulation est le suivant:

- établir un bilan des rejets d'eaux par temps de pluie pour un réseau d'assainissement de type unitaire d'une agglomération telle que la ville de Genève;

Dans le dessein de répondre à cet objectif, il est décidé de se concentrer sur la simulation des processus principaux intervenant dans les rejets d'eaux pluviales:

- les écoulements superficiels;
- l'évacuation (propagation) des écoulements superficiels à travers réseau d'assainissement et ses ouvrages hydrauliques.

Ne souhaitant pas effectuer d'évaluations qualitatives des rejets, les eaux usées ne sont pas intégrées dans le modèle. Nous postulons également que les eaux claires parasites sont inexistantes dans ce réseau. Dans un réseau de qualité qui ne draine pas les eaux souterraines, les eaux claires parasites ne devraient pas trop influencer la quantité d'eau rejetée dans les milieux naturels. Cette seconde hypothèse n'est donc pas trop préjudiciable.

³ ArcGIS est un programme élaboré par la société ESRI. De plus amples informations sont disponibles auprès du site internet www.esri.com.

⁴ ArcHydro est un outil ArcGIS disponible auprès du site www.cwrw.utexas.edu/giswr/hydro. Il est gratuit pour les possesseurs de la licence ArcGIS

⁵ Par résolution nous entendons le degré d'abstraction de la réalité

4.1.2 Description du concept du modèle

Pour que nous puissions modéliser les deux phénomènes précités, il faut cibler les acteurs responsables de ces processus en réalité, et leurs objets correspondant dans le logiciel PCSWMM (cf. chapitre 3.4.2). Ainsi, il y a :

- Les bassins de drainage, acteur permettant la production des eaux de ruissellement qui sont représentés par l'objet *subcatchment*;
- Les collecteurs, acteur permettant la propagation de l'écoulement qui sont représentés par l'objet *Conduit*;
- Les chambres, déversoirs d'orages et bassins de rétention et autres ouvrages hydrauliques, acteurs permettant la liaison entre les collecteurs, entre les conduites et les bassins de drainage et entre les conduites et leur milieu récepteur. Ils qui sont représenté par les objets *Junctiun Node*, *Weir*, *Storage units*, *Outlet Flow*, *Divider Nodes*. Pour nommé l'ensemble de ces objets, le terme nœud est utilisé dans la suite de ce rapport.

Le schéma ci-dessous synthétise les acteurs et les processus intégrés dans le modèle.

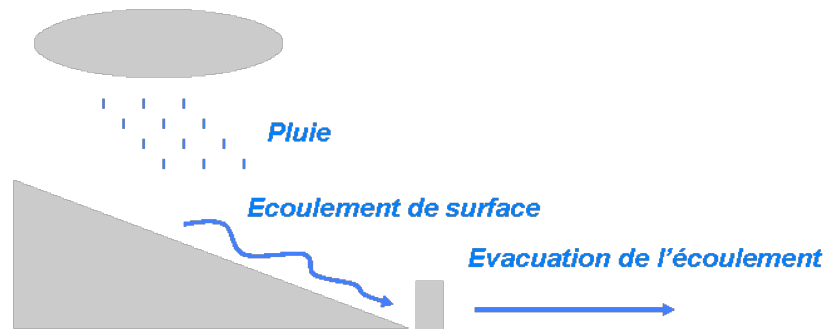


Figure 3 Processus et objets modélisés

En vue d'établir le modèle en milieu urbain, il n'est ni nécessaire d'introduire tous les collecteurs du réseau d'assainissement, ni tous les ouvrages hydrauliques qui lui sont associés. Ceci pour plusieurs raisons, tant pratiques, hydrologiques, qu'esthétiques :

- considérer tous les ouvrages du réseau d'assainissement nécessite une base de données très complète. Il ne suffit pas de connaître le tronçon, l'emplacement et les altitudes des ouvrages mais aussi toutes les données techniques. Connaître les données techniques d'ouvrages construits depuis le développement des villes réside de la tâche des archéologues!! Il y a de fortes chances que les caractéristiques des ouvrages soient perdues. Dans ce cas, il faudrait les négliger, ou formuler des hypothèses pour leur fonctionnement. Agir ainsi augmente les incertitudes du modèle. Il n'est donc pas certains d'aboutir à des résultats plus précis.
- les phases de calibration et de validation du modèle sont plus complexes avec un modèle comportant beaucoup d'entités.

- considérer un modèle possédant beaucoup de données le rend lourd lors de son exploitation. Les temps de simulation peuvent devenir très longs, ce qui complique l'exploitation et la simulation de scénarios. De plus, cela nécessite un matériel informatique performant.
- représenter un réseau de type maillé nécessite la méthode de routage par onde dynamique. Cela n'est pas possible avec tous les modèles et augmente considérablement la durée des simulations pour les modèles disposant de cette méthode de propagation des ondes.
- les fichiers de sortie des simulations deviennent difficile à exploiter et interpréter lorsqu'il y a beaucoup d'entités.
- un modèle lourd est plus difficilement exploitable par une autre personne que le modélisateur lui-même.
- l'aspect esthétique intervient éventuellement lors de présentation d'un modèle. Plus, il est simple, plus il devrait être convivial.

La méthodologie d'abstraction du modèle est établie en fonction des données qui seront obtenues ainsi que des liens nécessaires entre les trois objets dans PCSWMM.

Cependant d'une façon générale la démarche consiste à:

- simplifier le réseau de collecteur et de nœuds pour en tirer les entités constituant le réseau principal d'évacuation;
- délimiter les bassins de drainage en fonction du réseau simplifié;
- déterminer les points de liaison entre les bassins de drainage et le réseau de collecteur.

4.2 Collecte des données

Les données concernant les réseaux d'assainissement proviennent du Système d'Information du Territoire de Genève⁶ (SITG). Ce service dispose d'un catalogue complet des informations relatives à l'organisation du territoire dont notamment le cadastre du réseau d'assainissement des eaux. Les données sont disponibles sous forme de plans numériques, images ou objets vectorielles qui peuvent être visualisées et traitées avec le logiciel ArcGIS 9.2.

Les données sont traitées puis exploitées pour l'étape de construction du modèle. Elles sont de types vectoriel ou raster. Aucune donnée de débit n'a été collectée étant donné que la calibration et validation du modèle ne sont pas effectuées.

Par contre une série de précipitations de l'année 1998, de la station de Genève-Cointrin (numéro 58) servira de base pour une simulation. Les pluies sont données en millimètre pour un pas de temps de 10 minutes. Elles

Pour chacun des fichiers de données décrits dans les paragraphes suivants, un tableau récapitulatif des champs contenus dans la table est disponible dans l'annexe 1.

⁶ Les informations concernant le SITG sont disponibles en ligne sur www.sitg.ch. Les commandes peuvent directement être faites sur le site.

4.2.1 Données de format vectoriel

Elles sont fournies sous forme de couche de trois différents types: des polygones, des points ou des polygones.

- **Couche de type polyligne**

- **Collecteurs** (rae_collecteur.shape)

- Couche comprenant le réseau de collecteur d'eaux usées, d'eaux pluviales, d'eaux de drainage ou d'eaux mélangées.

- **Couches de type point**

- **Regards, chambres** (rae_regard_chambre.shape)

- Indique toutes les chambres du réseau avec leurs caractéristiques techniques (largeur, altitude du couvercle, altitude, profondeur).

- **Déversoirs** (rae_deversoir.shape)

- Détermine le type de déversoir ainsi que leurs caractéristiques techniques de dimensionnement.

- **Ouvrages de traitement** (rae_ouvrage_traitement.shape)

- Indique les ouvrages de traitement du réseau sans donner d'informations techniques sur les ouvrages.

- **Ouvrages spéciaux** (rae_ouvrages_speciaux.shape)

- Donne quelques informations administratives concernant les ouvrages de traitement telles que les limiteurs de débit, répartiteurs de débit, séparateur d'hydrocarbure, fosse de décantation, chambre de tranquillisation, siphon, puits de chute, chambre de mise en charge etc.

- **Points de changements caractéristiques** (rae_pt_chgmt_caracteristiques.shape)

- Points du réseau qui présentent un changement de pente, de matériaux, de diamètre, ou de forme de collecteur.

- **Points de raccordement** (rae_pt_raccordement.shape)

- Détermine tous les branchements des privés sur le réseau de collecteur.

- **Points de rejet** (rae_pt_rejet.shape)

- Indique tous les points où il est possible d'avoir des rejets dans un exutoire naturel

- **Stations de pompage** (rae_station_pompage.shape)

- Détermine les points où se trouvent des stations de pompes.

Remarques :

- Le réseau est ainsi construit que pour chaque entité de la couche "collecteur", il existe en ses deux extrémités une entité du format point décrites ci-dessus. Ainsi, dans la table attributaire des collecteurs, il se trouve un champ *id_aval* et *id_amont* qui indique le numéro identifiant de l'entité "point" accrochée à chacune des extrémités. Ce détail à son importance pour l'étape de la construction du modèle.
- Dans la suite de ce rapport le terme nœud désignera les entités appartenant aux couches point décrite ci-dessus.

- Tant qu'il n'est rien précisé, lorsque l'on caractérise un ouvrage par son altitude, on parle d'altitude à la base de l'objet (par exemple l'altitude d'une chambre détermine l'altitude au fond de la chambre, ou l'eau s'écoule).
- Tous les nœuds ne possèdent pas un champ déterminant leur altitude. En fait, seules les couches "déversoirs" et "collecteurs" ont une indication d'altitude.

- **Couches de type polygone**

- **Bassins versants naturels** (lce_bassin_versant.shape)

- Délimitation des périmètres des bassins versants naturels du canton de Genève

- **Bassins versants d'assainissement** (rae_schéma_bassin_versant.shape)

- Délimitation de bassins versants d'assainissement pour le canton de Genève.

4.2.2 Donnée de format raster (image)

Outre un plan du cantonal à l'échelle 1:30'000 et les orthophotos du canton, les grilles indiquant des informations quant à l'occupation du sol et des indications concernant le relief ont été commandées. Les grilles sont des images qui sont divisées de manières régulières en cellules. Chacune de ces cellules est associée une information (par exemple une altitude, un type d'occupation du sol, etc)

- **Grid "Modèle numérique de terrain (MNT)"**

La grille MNT permet de connaître une altitude pour chaque mètre carré du canton de Genève. Cette altitude représente le terrain naturel. Elle est mesurée au pied de la végétation grâce à des techniques pénétrant le feuillage. Elle est interpolée sous les bâtiments à partir des altitudes au pied des constructions. La résolution⁷ (taille de la cellule) de cette grille est de un mètre, elle dispose d'une précision planimétrique de 30 à 40 cm et d'une précision altimétrique de 15 à 25 cm.

- **Grid "Végétation"**

Cette grille comprend les arbustes, les haies, les arbres. Elle ne contient donc pas les surfaces végétalisées « basses » telles que les jardins, prés et surfaces agricoles. Elle possède également une résolution de un mètre et la précision planimétrique est de un à deux mètres.

- **Grid "Bâtiment"**

Cette grille détermine le Bâti sur le canton de Genève. Le terme bâti comprend les maisons et immeubles d'habitation, de commerce et agricole, ainsi que les garages, couverts, etc...Les routes, autoroutes et chemins imperméables ne sont pas intégrés dans cette grille. Les caractéristiques sont identiques à la grille végétation.

Signalons que les MNT sont des fichiers volumineux. Pour cette raison le SITG a découpé l'ensemble du canton de Genève en tuile de 3 km x 3 km (c'est à dire une tuile composée de 3000 cellules par 3000 cellules de dimension de 1 m). Pour chacune de ces tuiles, une grille végétation, bâtiment et un MNT est disponible.

⁷ indication obtenues sur le site www.sitg.ch

4.3 Choix de la zone test de modélisation

Les problèmes de la taille de la zone modélisée, ainsi que de la résolution du modèle restent à résoudre. Ces questions ont fait l'objet de beaucoup de réflexions au cours du travail.

En hydrologie, l'unité géographique qui caractérise le cycle hydrologique est le bassin versant. En hydrologie urbaine, les routes, les constructions, le réseau d'assainissement et les ouvrages hydrauliques modifient le comportement hydrologique du terrain. Il n'est donc pas judicieux de travailler sur bassins versants.

Afin d'atteindre les objectifs fixés, les critères suivant peuvent être énoncés pour le choix d'une zone test de modélisation:

- elle doit contenir entièrement un bassin d'assainissement:

Par ce critère, toutes les eaux de surface alimentant le réseau d'évacuation sont prises en compte. Ceci permettra d'inclure les ouvrages du réseau d'assainissement et notamment les déversoirs d'orage et les répartiteurs de débit dans le modèle. En effet, si une partie du réseau est tronquée en amont, les écoulements simulés seraient diminués de la part du ruissellement produit dans les zones ignorées, ainsi le fonctionnement des déversoirs d'orage seraient perturbés et les rejets sous-évalués.

- elle doit posséder une forte densité urbaine:

Ce critère est défini afin que la zone soit bien représentative des phénomènes spécifiques à l'hydrologie urbaine. Ainsi, les résultats pourront être plus facilement nuancés puisque la production des eaux superficielles dépend spécifiquement du taux d'imperméabilité du sol.

- elle doit avoir une base de données des ouvrages du réseau très précise par rapport au besoin:

Ce critère va permettre de transcrire plus fidèlement la réalité. Même si un modèle nécessite une abstraction de la réalité, le fait de posséder des données précises évitent de poser des hypothèses pour les objets dont on ne connaît pas la description.

L'information des limites des bassins d'assainissement est connue. Elle est disponible dans la couche "rae_schéma_bassin_versant.shape". C'est donc l'unité de base qui est utilisée pour la suite du choix de la zone.

En appliquant ces critères à la région genevoise plusieurs options se présentent à nous pour choisir une zone test (la visualisation des ces options est visible sur l'annexe 2):

Option 1: considérer tous les bassins d'assainissement

On pourrait imaginer de prendre tous les bassins d'assainissement qui sont référencés. Cela constituerait un modèle complexe. En effet, dans la région genevoise, on dénombre 12 STEPs cantonale et 4 STEPs privées dont les capacités varient de 100 EH à 600'000 EH. Plus de 150 bassins d'assainissement sont connectés à ces différentes STEPs. Les caractéristiques des bassins d'assainissement sont très différentes. Il est possible de les différencier en fonction de leur taille (variant de 0, 5 ha à 3700 ha), du type de réseau d'évacuation des eaux (unitaire, séparatif, mixte) ainsi

que par leur degré d'urbanisation (forte densité au centre de Genève et plus faible dans les petites communes alentours). Réussir à intégrer toutes ces inhomogénéités dans un modèle est digne d'un casse-tête chinois. Une telle surface (21'800 ha pour tous les bassins) représente une grande charge de travail dans la manipulation et le traitement des données (plus de 70'000 collecteurs, et chambres plus de 1000 ouvrages de traitement et plus de 300 ouvrages spéciaux). De plus, le plus "gros producteur" d'eau de ruissellement est le centre de Genève. Il ne serait pas forcément pertinent d'associer les petites communes alentours disposant d'une faible densité urbaine par rapport au centre ville.

Pour ces raisons, l'option de cette "échelle" n'est pas considérée.

Option 2: considérer un bassin d'assainissement

Notre choix se restreint donc l'échelle d'un bassin d'assainissement. Parmi tous les bassins d'assainissement, il faut tout de suite écarter ceux qui ont des secteurs faisant partie du territoire français car on ne dispose pas de données. Parmi les réseaux restant sur le territoire Suisse dont on dispose de données, la plus grande partie du territoire est assaini par le réseau d'assainissement d'Aire. Les autres réseaux présentent le désavantage d'assainir des zones à moyenne densité urbaine.

Afin de bien cerner les problèmes liés à la gestion des eaux urbaines il semble donc être judicieux de se concentrer sur le réseau d'Aire qui draine les parties à forte densité. Cependant, cette surface ne règle pas les problèmes de quantité de données à traiter puisqu'elle contient toujours plus de la moitié des objets de la totalité de bassins. Cette possibilité est écartée car elle présente toujours trop d'entités.

Option 3: considérer un secteur de bassin d'assainissement

Toutes ces considérations faites, il semble en découler qu'il va falloir trouver une zone à l'intérieur du réseau d'assainissement d'Aire. Ce réseau possède l'avantage d'être découpé en plusieurs secteurs. Cependant les secteurs présentant un intérêt du point de vue de la densité urbaines sont de très grande surfaces et disposent toujours d'énormément d'entités.

A ce niveau de raisonnement je me résous à déterminer une zone test sans fondement hydrologique de façon subjective qui ne respecte que les deux derniers critères présentés précédemment.

Pour satisfaire à ces deux conditions, le choix est porté en plein centre de Genève. Elle possède une surface d'environ 400 ha.

Cette zone présente les avantages de posséder une partie de ses limites avec un secteur d'assainissement d'Aire (en fait elles confondent les berges du lac, du Rhône et de l'Arve latéralement), de réduire le nombre d'entité à environ 8000 collecteurs, 12 déversoirs d'orage, 33 répartiteurs de débit, de posséder une densité urbaine homogène et de n'avoir qu'un exutoire en aval. Les inconvénients de cette zone sont qu'elle ne suit aucune limite de bassin versant, coupe le réseau d'assainissement en de nombreux points en amont et possède quelques secteurs avec un collecteur spécifique à l'évacuation des eaux pluviales.

Comme l'objectif est de faire un modèle pour un réseau unitaire, nous posons le postulat suivant:

Postulat pour la zone test

La zone est considérée être en type unitaire. Pour les secteurs qui possèdent quelques tronçons en séparatif les tronçons d'eaux pluviales sont négligés.

Cette hypothèse peut être effectuée car la zone test n'est pas considérée comme une zone qui va être diagnostiquée, mais uniquement comme un outil de travail pour illustrer et construire le modèle ainsi que pour effectuer une simulation fictive dans le but de percevoir les paramètres primordiaux sur les hydrogrammes.

La figure suivante donne un aperçu de la zone test dans son contexte de la ville de Genève