

CHAPITRE 3

APPROCHE UTILISÉE

3.1 Objectifs de la recherche

L'objectif du projet de recherche est de développer une approche méthodologique pour diminuer le risque d'inondation et réduire la fréquence des débordements dans le milieu naturel. Cette approche méthodologique sera illustrée à travers une étude d'un projet d'envergure qui est celui du quartier centre-ville de l'arrondissement Verdun de la ville de Montréal, communément appelé le bassin hydrographique Rhéaume.

3.2 Méthodologie

La méthodologie employée se divise en quatre étapes distinctes:

- faire un diagnostic pour déterminer les sources du problème;
- définir les performances hydrauliques et environnementales visées;
- évaluer les performances hydrauliques et environnementales actuelles;
- analyser les différentes avenues de solutions pour ramener les niveaux de performance au niveau souhaité.

L'efficacité du concept retenu sera évaluée à la lumière des résultats obtenus au cours de l'étude du cas. Dans les chapitres précédents l'identification des différents types de réseaux d'assainissements, leurs usages et la problématique inhérente à leur exploitation, maintenance et entretien furent abordés. Par la suite, les méthodes actuelles de réhabilitation hydraulique et environnementale furent présentées. Les sections qui suivent aborderont les aspects touchant l'établissement d'un modèle et son analyse en vue de l'élaboration d'avenues de solutions. Mais tout d'abord il faut préciser le cadre général et les fondements théoriques et méthodologiques de cette analyse.

3.2.1 Comment connaître l'état fonctionnel des réseaux

Aux fins de l'analyse des dysfonctions hydraulique et environnementale d'un réseau d'assainissement il importe de se questionner sur plusieurs objectifs tels que :

- respecter les exigences relatives au volume et à la qualité des eaux pluviales;
- respecter les normes relatives à l'alimentation de la nappe d'eau souterraine et au débit de pointe;
- contrôler et diminuer les impacts sur l'habitat aquatique du cours d'eau récepteur;
- utiliser l'aménagement complet du territoire afin de minimiser les contrôles structureaux;
- protéger les zones plus sensibles à l'intérieur ou dans l'environnement immédiat du site;
- identifier les contraintes physiques du territoire;
- estimer l'entretien requis et la rentabilité des techniques et des ouvrages alternatifs;
- évaluer l'acceptabilité sociale et environnementale du système de gestion des eaux pluviales.

Les critères d'appréciation relatifs aux solutions qui seront mises de l'avant sont divisés en cinq classes :

- la qualité de l'eau;
- le potentiel d'érosion;
- le volume d'eau;
- le cycle hydrologique;
- les exigences relatives à l'entretien.

Les critères de la qualité de l'eau se rapportent aux habitats aquatiques, à la charge de polluant, à la température, aux activités de loisirs et à la contamination de la nappe d'eau souterraine (InfraGuide, 2003).

Comme nous l'avons évoqué précédemment en milieu urbain la connaissance de l'état fonctionnel et des conditions réelles de fonctionnement des réseaux est devenue essentielle à leur conduite, leur entretien, leur évaluation et leur réhabilitation. Ce constat milite en faveur de la mise en place d'outils modernes de diagnostic hydraulique et environnemental.

3.2.2 Diagnostic hydraulique et environnemental

Outre les constats de base visibles qui découlent de la présence ou non d'inondations et de déversements de polluants dans l'environnement le diagnostic hydraulique et environnemental est lié à notre capacité de mesurer, de quantifier et de qualifier les phénomènes sous étude. À cette fin il faut avoir recours à une multitude de données fiables, à des modèles susceptibles de reproduire le plus fidèlement possible les comportements. Aujourd'hui pour obtenir ces données des inspections rigoureuses et l'utilisation extensive des nouvelles technologies de mesures, d'auscultation, de monitoring incluant la télémessure et la télésurveillance s'avèrent nécessaires. L'utilisation d'outils informatiques de calcul performants pour le traitement de ces données est la pierre angulaire d'une modélisation adéquate et d'un diagnostic fonctionnel exact et pertinent.

Il faut aussi adopter un cadre méthodologique structuré et tout aussi rigoureux. La figure 12 adaptée par Bennis du guide du WRC propose une méthodologie en neuf étapes. Cette méthodologie vise à partir des données et des inventaires de base sur les réseaux et des résultats d'une analyse de risque à mettre au point un programme d'enquête et d'auscultation. (S. Bennis, 2004).

Ce processus présenté à la figure 13 est utilisé pour évaluer l'intégrité structurale, les débits parasites, les conditions hydrauliques et environnementales et pour la construction de fonctions de performance.

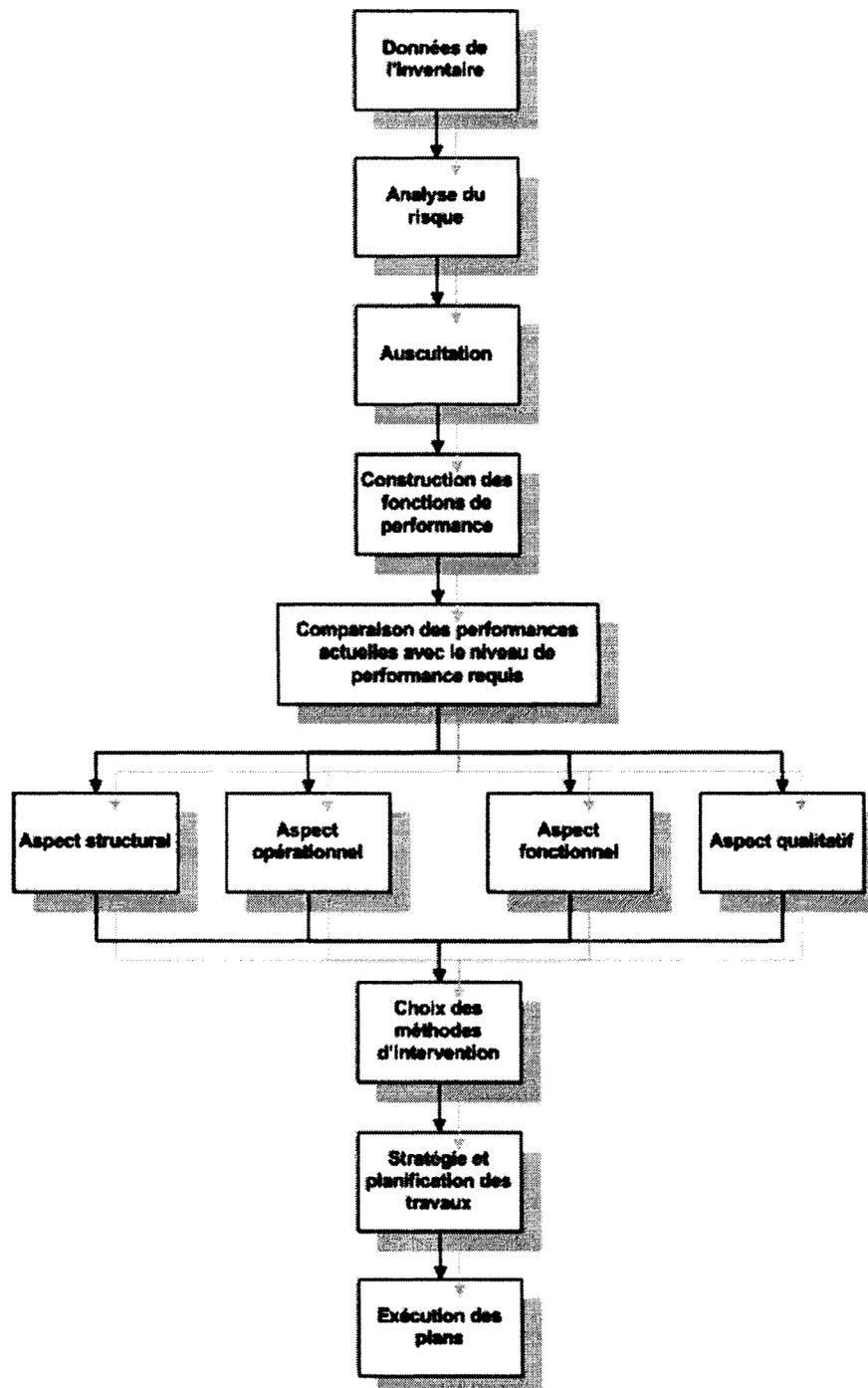


Figure 12 Approche structurée pour la réhabilitation (S. Bennis, 2004)

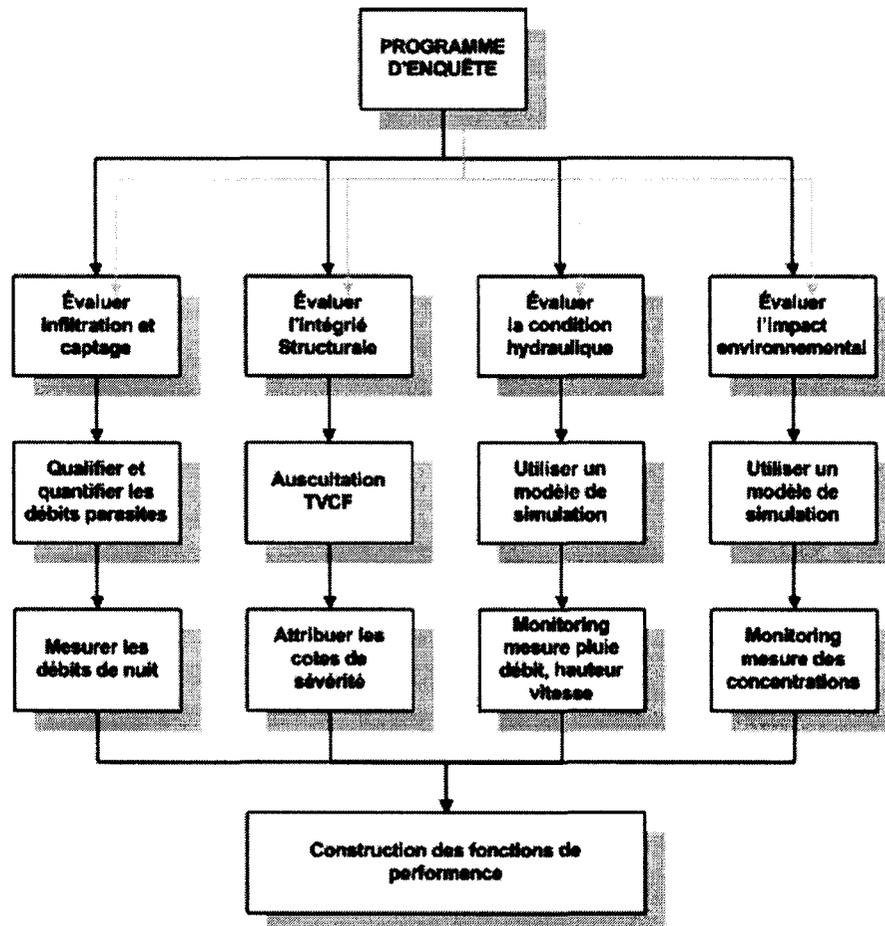


Figure 13 Construction des fonctions de performance (S. Bennis, 2004)

Ces fonctions de performance sont utilisées pour établir les niveaux de performances structurales, opérationnelles, fonctionnelles et qualitatives des réseaux. Ces niveaux sont déterminés à l'aide de modèles alimentés de données supplémentaires provenant de campagnes de mesures sur le terrain ou de systèmes de monitoring continu.

Elles permettent de procéder, à des choix éclairés de méthodes d'intervention à la lumière de ces informations et à l'élaboration d'une stratégie d'intervention. Cette stratégie se concrétise par la mise en œuvre d'un plan de travail détaillé, figure 14.

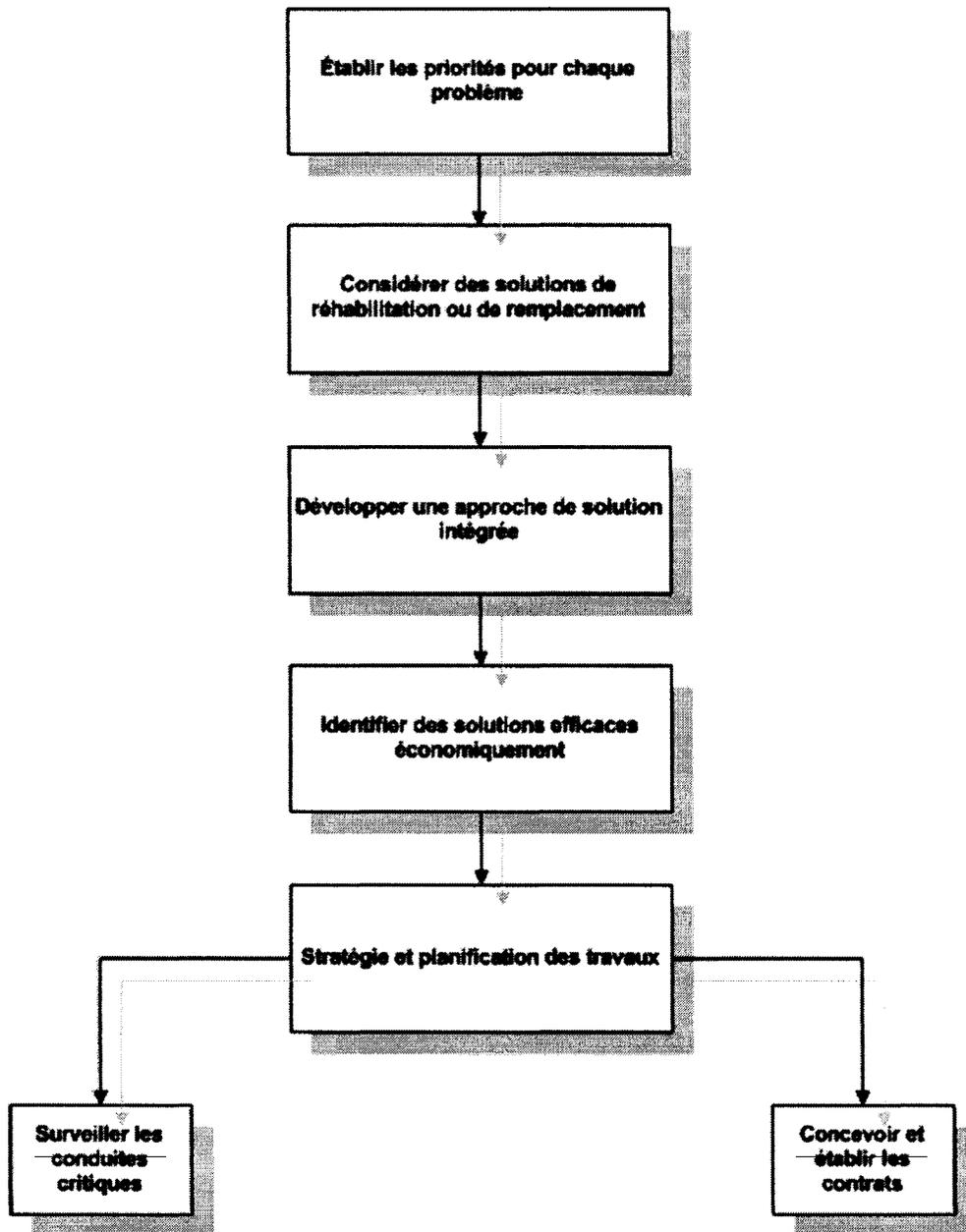


Figure 14 Mise en oeuvre du plan (S. Bennis, 2004)

Ce plan de travail doit tenir compte du niveau de priorité de chaque problème, des diverses alternatives de solution suivant une approche intégrée, pragmatique et économique.

3.2.3 Apport de la modélisation

De nombreuses avancées dans les méthodes de modélisation et l'accessibilité à de l'équipement informatique performant ont permis le développement de logiciels modélisant les précipitations et le phénomène du ruissellement sur les bassins versants. Certains logiciels permettent aussi d'évaluer les polluants transportés par les eaux de ruissellement.

Ces logiciels possèdent un avantage remarquable par rapport à l'utilisation de formules simples ou d'abaques. L'usage d'outils informatisés permet de représenter et comprendre le fonctionnement de situations complexes sans recours à des hypothèses simplificatrices qui nous écartent de la réalité. Il est aussi possible de simuler le fonctionnement du réseau dans son intégralité avec des pluies et débits variables dans le temps. Tous les phénomènes hydrologiques et hydrauliques peuvent être pris en compte et simulés adéquatement. Toutes ces fonctionnalités sont rendues possibles par le fait que la vitesse d'exécution des calculs de conception est beaucoup plus rapide qu'auparavant. Cela permet d'exécuter plusieurs simulations rapidement à partir de différents paramètres de conception et de différentes conditions de bassins versants.

Toutefois tous les logiciels disponibles sur le marché ne peuvent être utilisés sans discernement pour résoudre tous les problèmes. Le choix d'un modèle doit donc prendre en compte la portée et les contraintes techniques du problème que l'on veut résoudre. Ce modèle doit pouvoir tenir compte des différentes composantes du système sous analyse et posséder une capacité de traitement suffisante en fonction du nombre d'éléments constituant le réseau sous étude. Le coût du modèle et des calculs afférents, doivent être également proportionnels à l'envergure de la tâche à accomplir. D'autres considérations peuvent également influencer le choix de l'outil de calcul, comme la disponibilité du modèle, le support technique offert et la souplesse lors de l'utilisation.

Des contraintes techniques interviennent dans le choix de l'outil de calcul dans la mesure où le modèle doit générer des résultats compatibles avec les critères de performance choisis. Par exemple dans le cas précis des réseaux d'assainissement le modèle doit pouvoir prendre en considération les surcharges sur l'ensemble du réseau et être en mesure de solutionner les équations de Saint-Venant.

Le modèle doit de plus considérer les conditions particulières propres au milieu étudié et reproduire les phénomènes hydrologiques et hydrauliques rencontrés en milieu urbain : ruissellement, infiltration et captage.

Par contre il s'avère encore difficile de quantifier les apports par captage et infiltration dans les réseaux sanitaires et pseudo-séparatifs en temps de pluie. Plusieurs approches ont été développées pour estimer ces apports. Elles supposent pour la plupart que des mesures de débit et de pluie sont disponibles afin d'évaluer le comportement hydraulique de ce type de réseaux (Rivard, 1998).

La simulation hydrologique est un moyen efficace pour simuler les débits de ruissellement à l'exutoire d'un bassin versant résultant d'une pluie choisie. Les hydrogrammes ainsi simulés peuvent être utilisés directement pour une ou plusieurs des fins suivantes :

- faire la l'étalonnage de modèles;
- générer la concentration des polluants;
- constituer le fichier intrant au modèle hydraulique;
- faire la conception ou l'évaluation d'un ouvrage d'assainissement;
- générer la redondance analytique pour faire la validation du débit mesuré à l'exutoire d'un bassin;
- faire des bilans des volumes et masses de polluants déversés et leur fréquence;
- faire la prévision des débits et des concentrations de polluants.

Il faudra aux fins de ces évaluations procéder à la modélisation. La modélisation du secteur sous étude est la procédure qui tend à représenter mathématiquement les éléments physiques du réseau.

Cette représentation mathématique sera par la suite utilisée lors de la simulation du comportement du réseau.

Cette procédure peut être divisée en quatre (4) étapes ; la collecte, l'organisation et l'analyse des données nécessaires à l'élaboration du modèle et la préparation du fichier informatique.

Les données nécessaires à la modélisation peuvent être regroupées en trois (3) catégories ; les données caractérisant la pluie, la surface de ruissellement et celles caractérisant les canalisations et les autres équipements que l'on retrouve dans les réseaux d'assainissements, pompes, bassin de rétention, déversoirs pour n'en nommer que quelques-uns.

À titre d'exemple les modèles courants permettant la simulation des phénomènes hydrologiques et hydrauliques rencontrés en milieu urbain. Ils doivent être en mesure de tenir compte de la nature des surfaces et de leur degré de perméabilité dans la production des hydrogrammes de ruissellement et tel que représenté à la figure 15 pour, l'infiltration et le captage.

Également ces modèles doivent permettre de simuler à des fins de design ou d'évaluation le laminage des hydrogrammes et les différents types d'écoulement en réseaux, que ce soit à surface libre ou en charge tel qu'illustré à la figure 16.

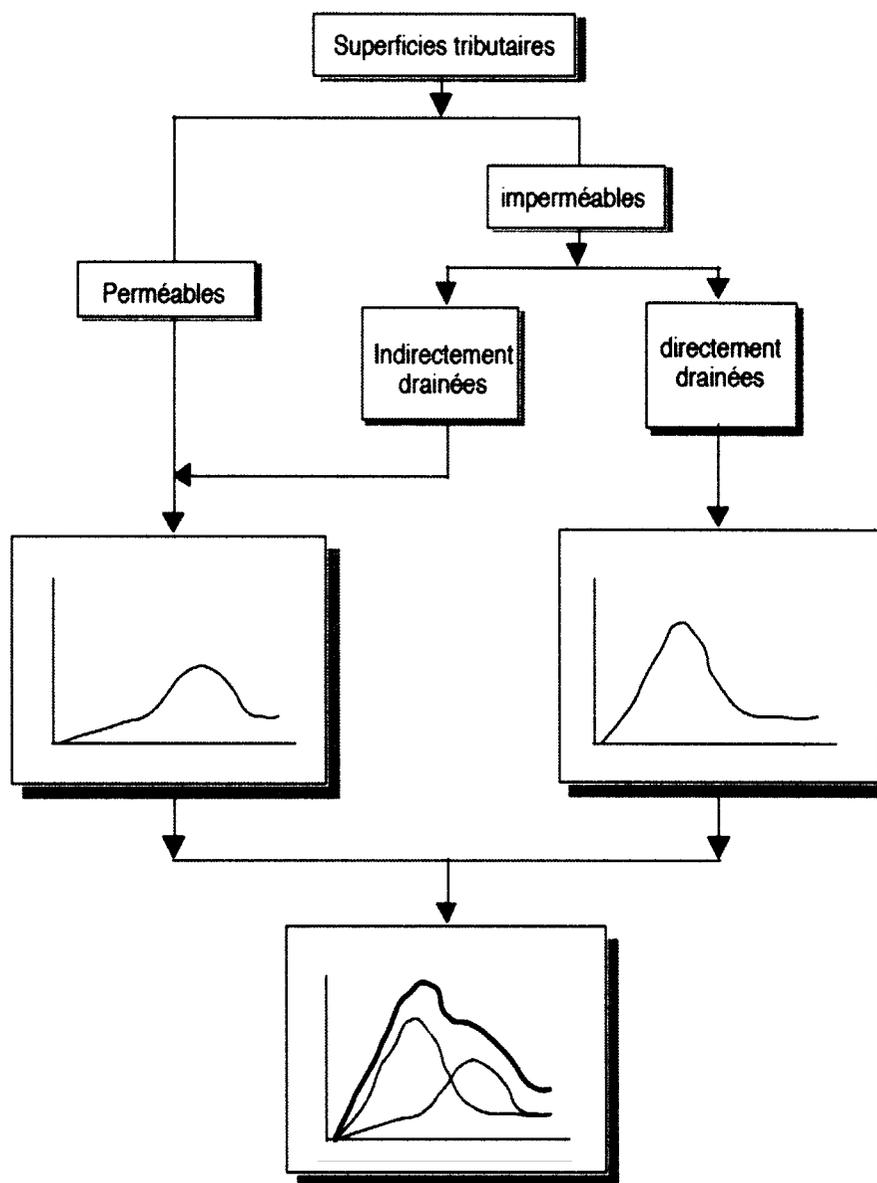


Figure 15 Génération des hydrogrammes

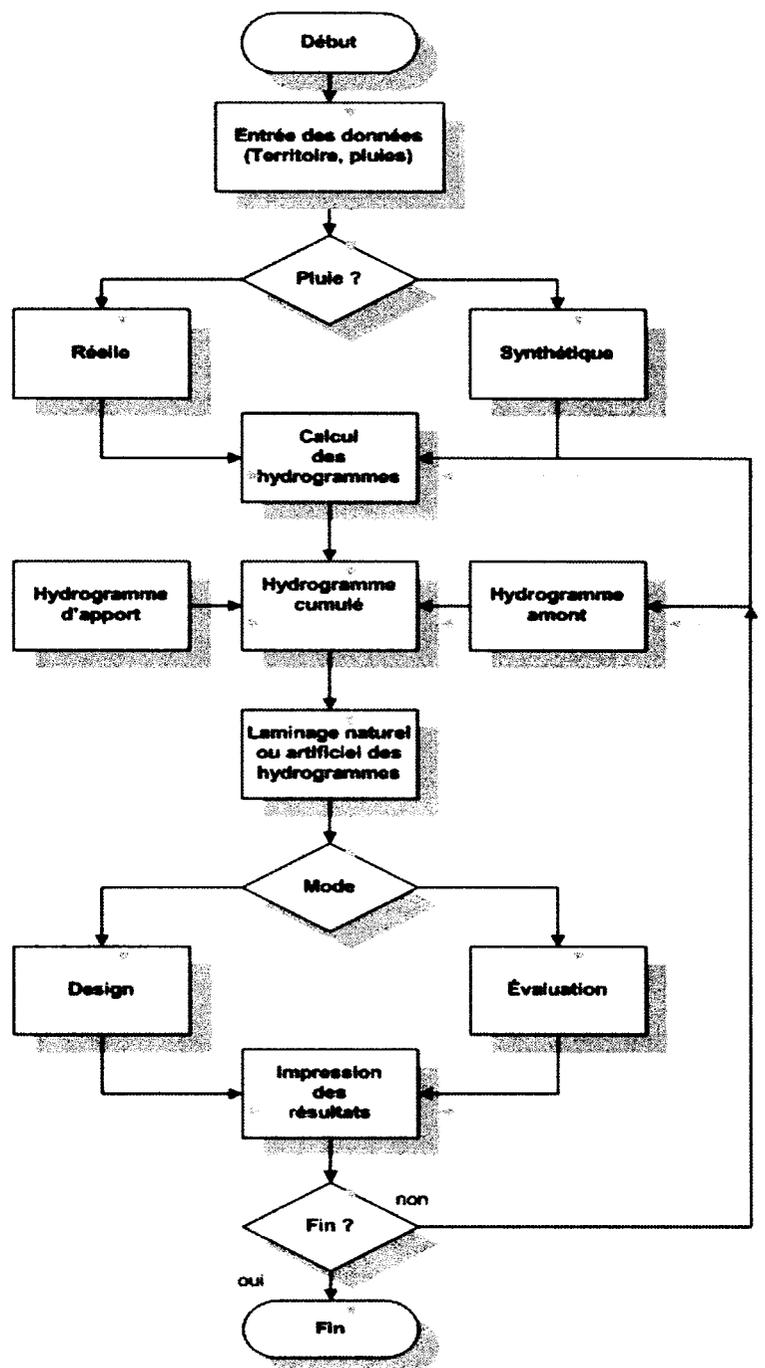


Figure 16 Organigramme fonctionnel des logiciels courants

Rappelons à cette étape que lorsqu'un modèle est utilisé il est essentiel de procéder à son étalonnage à l'aide de mesures prises sur le terrain. Ce processus consiste à ajuster les paramètres d'un modèle de façon à ce que les résultats des simulations s'approchent le plus possible des paramètres mesurés.

Pour faire la validation des mesures ou étalonner un modèle on doit donc réaliser une campagne de mesure. Celle-ci devra coïncider avec les débits simulés à l'aide du modèle hydrologique et fournir ainsi un fichier des débits mesurés. Cette comparaison est effectuée par le biais d'hydrogrammes d'apports constitués des valeurs mesurées qui sont directement introduites dans le modèle tel qu'illustré à la figure 16.

L'étalonnage et la validation constituent donc des étapes primordiales pour assurer la validité des résultats qui en seront extraits. Ils devraient être réalisés dans le meilleur des cas lorsque des mesures pluviométriques et de débits sont disponibles. Idéalement le modèle est étalonné avec une première série de pluies et il est validé dans une deuxième étape en comparant les résultats simulés aux paramètres mesurés pour une autre série d'événements de façon à pouvoir juger de la qualité et de la robustesse de l'étalonnage (Charron, 1994), (Rivard, 1998).

Les données de précipitations doivent être connues avec un certain niveau d'exactitude. Le niveau de précision dépend de la méthodologie employée pour l'acquisition des données. À cause d'une part de la mesure ponctuelle de l'intensité et des effets du vent sur la qualité de ces mesures et d'autre part de la variation spatiale de la pluie. La localisation et la densité des pluviomètres sur le territoire à l'étude constituent donc des considérations de première importance pour caractériser de façon réaliste les paramètres d'entrée d'un modèle (Deveau, 2001).

Les débits mesurés à différents points du réseau représentent les paramètres de sortie du modèle ou les valeurs auxquels les résultats du modèle devront correspondre.

Généralement les mesures de débit sont réalisées en continu par l'évaluation de la hauteur et de la vitesse de l'écoulement. Le niveau de précision des mesures est fonction du type d'instrumentation utilisé et des étalonnages effectués ainsi que de leur localisation sur le réseau.

Pour obtenir des mesures fiables, il est recommandé de positionner les appareils de mesure à des endroits où l'écoulement est permanent (Deveau, 2001).

Comme la qualité de ces observations est déterminante pour l'efficacité de l'étalonnage du modèle et en conséquence de la fiabilité des résultats les données recueillies devront donc être validées. Il est de plus évident que l'efficacité de ce travail repose sur le nombre d'événements observés. Ainsi, plus ce nombre est grand et plus la variabilité dans la nature des sollicitations est couverte. Par conséquent, plus les résultats seront valables.

Il faut toutefois une durée d'observation assez longue pour obtenir un nombre élevé d'événement. Un compromis doit être envisagé entre le coût d'évaluation et l'ampleur du problème. Il est fortement conseillé de recueillir un minimum de trois à cinq événements pour considérer la campagne comme étant une réussite (WRC, 2001).

Afin d'évaluer la qualité, des critères doivent aussi être établis afin de comparer les paramètres mesurés avec les valeurs simulées par le modèle.

Trois critères pour l'étalonnage sont généralement utilisés:

- Le rapport des volumes d'eau captés dans le réseau de conduites.
- Le rapport des débits maximaux.
- La différence entre les temps d'occurrence du débit de pointe.

Ce dernier critère représente un indicateur de la simultanéité entre les conditions mesurées et les conditions simulées.

Enfin il faut vérifier la sensibilité du modèle à la variation des valeurs des paramètres de la modélisation. L'objectif de cette analyse de sensibilité est d'établir la pertinence des paramètres de la modélisation suivant l'influence de leur variation sur les résultats des simulations en terme de critères de calibration pour des conditions données. C'est la seule étape qui peut être utilisée pour évaluer le degré d'incertitude associée à l'utilisation du modèle en l'absence de données réelles.

Pour mettre en œuvre la méthodologie présentée ici dans le cadre de cette étude, le logiciel XP-SWMM (XP-Software, 2000) a été retenu. XP-SWMM est une version commerciale de SWMM. C'est un logiciel de simulation très complet permettant la simulation de phénomènes hydrologiques et hydrauliques en milieu rural ou urbain. Ses fonctions sont très étendues et l'espace de travail est convivial. De nombreuses possibilités de visualisation et d'exploitation des résultats sont offertes comme les graphiques, les vues en coupe animées des hauteurs d'eau dans les conduites ou la mise en évidence de mises en charge et débordements.

XP-SWMM contient trois modules, qui peuvent être utilisés de manière indépendante ; un module ruissellement, un module sanitaire et un module hydraulique. Un élément du réseau peut se trouver dans un seul ou plusieurs module ou au contraire n'exister que dans un des modules (comme par exemple un bassin versant, dans le module ruissellement).

Le module ruissellement contient la partie « hydrologique » du logiciel, qui permet la mise en place des bassins et sous-bassins versants et la génération du ruissellement. Neuf méthodes de calcul d'hydrographe sont disponibles. Le module sanitaire traite de l'évacuation des eaux domestiques. D'un point de vue hydraulique, les éléments du réseau seront les mêmes que ceux du module hydraulique, mais la génération des débits est afférente à la production d'eaux usées et non aux événements de pluie.

Le module hydraulique achemine les débits générés en différents points par les modules précédents. Il calcule l'acheminement de ces eaux en utilisant différentes méthodes de calcul.

XP-SWMM possède également de nombreuses fonctions permettant la simulation et l'analyse d'aspects qualitatifs. Il utilise une représentation de connectivité classique conduites et nœuds. Les nœuds sont des points spécifiques du réseau où intervient un changement géométrique et/ou hydraulique (pente, ...). Les conduites ont des propriétés constantes sur toute leur longueur.

Ce choix a donc été motivé par la facilité d'utilisation que ce logiciel procure comparé au logiciel SWMM auquel il emprunte le moteur de calcul. Il faut noter que SWMM bénéficie d'une grande popularité en Amérique du Nord où il constitue une référence pour la simulation du comportement hydraulique et hydrologique des réseaux d'assainissement (Huber W.C., 1988).

Ce modèle est basé sur la résolution des équations de Barré de Saint-Venant par une méthode de différences finies (Thompson *et al.*, 1993) et par la méthode du réservoir non linéaire.

Cette méthode est très utilisée pour simuler le ruissellement en milieu urbain lorsqu'on fait appel à l'informatique et elle est particulièrement utile pour un réseau très plat et maillé. La méthode du réservoir non linéaire est basée sur le couplage de l'équation de continuité et de l'équation de Manning (2).

L'équation de continuité s'écrit :

$$\frac{dS}{dt} = A \frac{dd}{dt} = Ai^* - Q \quad (3.1)$$

- où d est la profondeur de l'eau du bassin (m),
 A est la surface du bassin (m^2),
 $S = Ad$ est le volume d'eau disponible dans le bassin à l'instant t (m^3),
 t est le temps instantané (s),
 i^* l'intensité des précipitations nettes
(pluie brute + fonte – infiltration – évaporation) en m/s.

Le débit de sortie Q est donné par l'équation de Manning écrite sous la forme suivante:

$$Q = W \frac{1}{n} (d - d_p)^{5/3} S_0^{1/2} \quad (3.2)$$

- où W est la largeur de drainage du bassin, pour un bassin en fonction de la longueur du chenal principal L et de la superficie totale A ;
 n est le coefficient de Manning;
 d_p est la profondeur de stockage dans les dépressions (m);
 S_0 est la pente du terrain (m/m).

En utilisant l'équation de Manning (2) dans l'équation de continuité (1), on obtient l'équation à solutionner suivante:

$$\frac{dd}{dt} = i^* + W \frac{S_0^{1/2}}{nA} (d - d_p)^{5/3} \quad (3.3)$$

Sous forme de différences finies, l'équation (3) devient :

$$\frac{d_2 - d_1}{\Delta t} = i^* + W \frac{S_0^{1/2}}{nA} \left[d_1 + \frac{1}{2} (d_2 - d_1) - d_p \right]^{5/3} \quad (3.4)$$

À chaque intervalle de temps, la valeur de d_2 est trouvée à l'aide d'itérations par la méthode de Newton-Raphson.

Les différentes valeurs successives des profondeurs d permettent ensuite de calculer les débits correspondant à la sortie du bassin en utilisant l'équation (2).

La largeur du bassin W est souvent utilisée comme paramètre d'étalonnage pour moduler les débits simulés aux valeurs mesurées ou pour faire diminuer l'écart entre l'estimation du débit de pointe et le temps de montée. La fonction motrice étant la pluie il faut aussi introduire des événements pluviométriques dans le modèle pour évaluer le comportement hydraulique du système relativement aux critères de performance établis.

Cette tâche peut s'effectuer suivant deux approches. La première approche utilise des pluies synthétiques comme paramètre d'entrée au modèle de simulation et pour évaluer le comportement hydraulique du système. La deuxième approche nécessite l'utilisation d'une série de pluies réelles répartie sur plusieurs années. Le choix de l'approche est conditionné par certaines considérations telles que la disponibilité de données de base adéquates, la disponibilité de temps et le niveau de qualité ou de réalisme recherché.

La première approche est caractérisée par l'utilisation de pluies synthétiques. Une pluie synthétique peut être obtenue à partir des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF), avec une distribution temporelle plus ou moins arbitraire ou une pluie dont la distribution temporelle est dérivée à partir d'analyses sur des événements pluvieux historiques (Rivard, 1998).

Une période de récurrence est associée à ce type de pluie et cette période est présumée la même pour le volume ou le débit simulé par le modèle. La figure 17 illustre à titre d'exemple, les courbes IDF qui furent évaluées pour la région de Montréal.

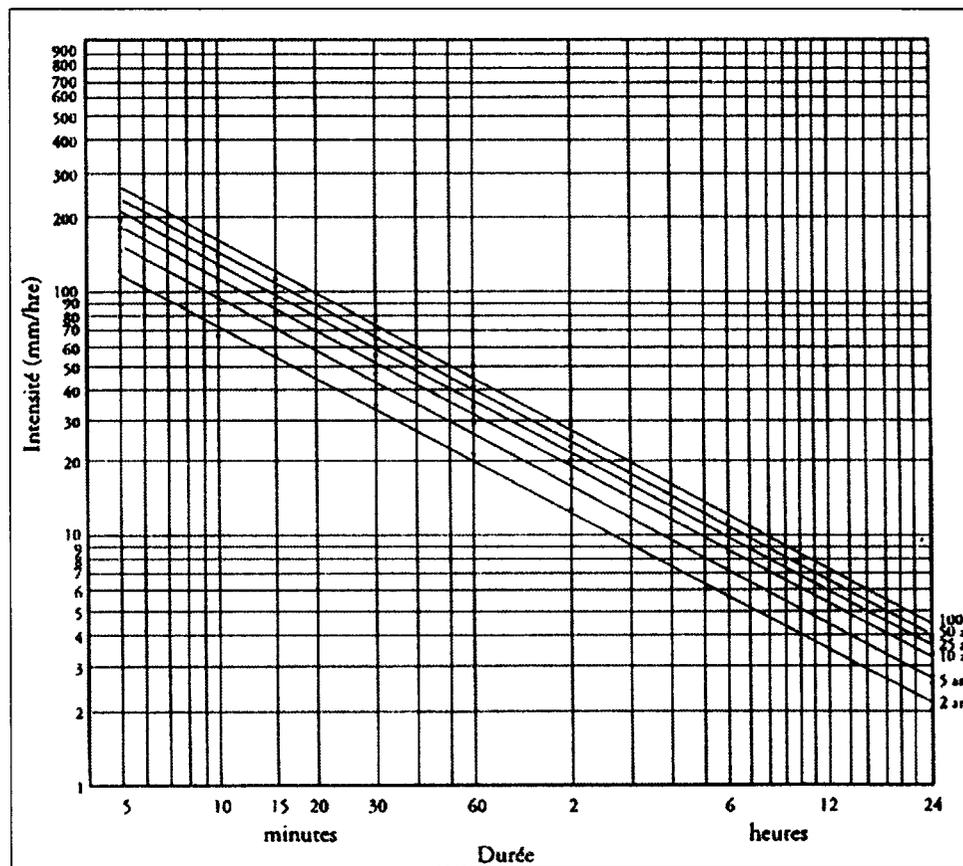


Figure 17 Courbes intensité-durée-fréquence Dorval

En soumettant le modèle à différentes pluies synthétiques possédant leurs propres périodes de retour, il est alors possible d'associer une récurrence à la défaillance du système relativement à chacun des critères de performance. Par la suite le modèle est modifié avec des scénarios possibles de solution.

Cette situation suppose que la période de retour des valeurs estimées correspond à celle de la pluie synthétique utilisée. Dans les faits cette hypothèse est fautive et il est nécessaire de recourir à une autre approche afin d'obtenir des résultats se rapprochant le plus des conditions réelles.

Cette approche consiste à utiliser une série de pluies réelles répartie sur plusieurs années. Conséquemment le comportement simulé par le modèle est obtenu par chacune des pluies de la série utilisée. L'analyse statistique de ces résultats permet également d'associer une récurrence à la défaillance du système relativement aux critères de performance établis préalablement.

Encore ici pour valider le modèle, il est essentiel d'avoir recours à une campagne de mesures sur le terrain. Il faut donc choisir des événements pluviométriques à utiliser pour les simulations parmi les événements pour lesquels des données sont disponibles.

Afin de limiter la subjectivité dans l'évaluation de la qualité et de la pertinence des résultats trois critères de performance mesurant l'écart entre les variables sont généralement calculées et les variables de référence doivent être considérées.

Le premier est le coefficient de Nash. En effet, ce coefficient est le critère le plus utilisé en hydrologie pour apprécier la concordance entre les débits mesurés et les valeurs de référence.

$$\text{Nash} = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1} [Q_{\text{ref}}(i) - Q_{\text{cal}}(i)]^2}{\sum_{i=1} [Q_{\text{ref}}(i) - Q_{\text{ref}}]^2} \right] \quad (3.5)$$

Où : $Q_{\text{ref}}(i)$: débit de référence à l'instant i (m^3/s),

$Q_{\text{cal}}(i)$: débit calculé à l'instant i (m^3/s),

Q_{ref} : débit moyen de référence (m^3/s)

Le rapprochement du coefficient de Nash de l'unité est un bon indicateur de la concordance entre les valeurs simulées et les valeurs de référence.

Dans un deuxième temps, pour analyser les problèmes de débordement, il est aussi primordial de connaître le rapport $Q_{\max} / Q_{\text{admissible}}$. On peut alors définir un critère de performance en rapport avec le débit de pointe par la relation suivante:

$$RQp = Qp \text{ cal} / Qp \text{ ref} \quad (3.6)$$

Comme pour le coefficient de Nash, le rapprochement de RQp de l'unité mesure la concordance entre les débits de pointe de référence et ceux simulés par l'approche préconisée.

Enfin, pour la gestion en temps réel, le synchronisme entre les débits simulés et les débits réels est d'une très grande importance. Toutes les stratégies de dérivation des flux reposent sur les temps de propagation des différents flux sur les bassins versants et dans le réseau de drainage. On peut donc aussi définir un critère de performance en relation avec le temps d'occurrence des débits de pointe, soit:

$$\Delta T = TQp \text{ simulé} - TQp \text{ ref} \quad (3.7)$$

Où $\Delta T = 0$, indique un synchronisme parfait.