HAL
open science

GESTION TEMPS REEL D'UN RESEAU D'ASSAINISSEMENT BASEE SUR LA SIMULATION D'UN MODELE CONTINU

Hend Nakouri, Daniel Jolly, Gilles Goncalves, Olivier Blanpain

To cite this version:

Hend Nakouri, Daniel Jolly, Gilles Goncalves, Olivier Blanpain. GESTION TEMPS REEL D'UN RESEAU D'ASSAINISSEMENT BASEE SUR LA SIMULATION D'UN MODELE CONTINU . MOSIM 2014, 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation, Nov 2014, Nancy, France. hal-01166676

HAL Id: hal-01166676

https://hal.science/hal-01166676v1

Submitted on 23 Jun 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

GESTION TEMPS REEL D'UN RESEAU D'ASSAINISSEMENT BASEE SUR LA SIMULATION D'UN MODELE CONTINU

H. NAKOURI, D. JOLLY, G. GONCALVES

Université Lille Nord France, F-59000 Lille, France
U-Artois, LGI2A EA 3926, F-62400 Béthune, France
hnakouri@yahoo.fr, daniel.jolly@univ-artois.fr,
gilles.goncalves@univ-artois.fr

O. BLANPAIN

Université Lille Nord de France, F 59000 Lille, France.
U-Lille1, TVES EA 4477, Lille, France
olivier.blanpain@univ-lille1.fr

RÉSUMÉ:

Les outils actuels de gestion en temps réel des réseaux s'appuient sur deux outils logiciels : les logiciels de prévision météorologique et les logiciels de simulation hydraulique. L'usage des premiers est une cause importante d'imprécision et d'incertitude, l'usage des seconds oblige à des pas temporels de décision importants du fait de leur besoin en temps de calcul. Cette façon de procéder fait que les résultats obtenus sont généralement éloignés de ceux attendus.

L'idée force du projet CARDIO est de changer de paradigme de base en abordant la problématique par la face « automatique » plutôt que par celle « hydrologie ». L'objectif est de rendre possible la réalisation d'un grand nombre de simulations en des temps très courts (quelques secondes) permettant de se passer des prévisions météorologiques en utilisant directement les données pluviométriques recueillies en temps réel. L'objectif est de parvenir à un système où la prise de décision est réalisée à partir de données fiables et où la correction de l'erreur est permanente.
Les premiers résultats obtenus à partir d'une simulation d'un exemple test montrent l'efficacité de l'approche développée.

Mots-clés : Réseau d'assainissement, modélisation, optimisation, automatique, gestion en temps réel, recherche locale.

1 INTRODUCTION

En Europe et notamment en France, les réseaux d'assainissement existent, dans leur forme moderne, depuis le 19ème siècle. La majorité des systèmes d'assainissement des grandes villes européennes sont de type unitaire, c'est-à-dire conçus pour transporter un mélange des eaux résiduaires et de l'eau de temps de pluie. Ces réseaux sont généralement reliés à des installations de traitement de capacité limitée qui ne peuvent souvent pas faire face aux événements pluvieux intenses (J.Vazquez et al, 2003). Les réseaux d'assainissement ont donc pour missions de limiter les apports à la station d'épuration dans le but de minimiser les rejets des eaux polluées non traités dans les milieux naturels. Leur fonctionnement initial était basé sur une autorégulation des flux les parcourant assistée, si besoin, par des soupapes de sécurité (les déversoirs d'orage). L'objet réseau était de fait passif devant l'aléa pluviométrique. Avec le développement de l'urbanisation et l'augmentation des surfaces imperméables, les flux d'eaux pluviales transitant dans les réseaux ont considérablement augmenté et entraîné un sur-fonctionnement des soupapes de sécurité au détriment du milieu naturel.
Les équipements existants sont souvent trop petits par rapport à cet objectif de traitement et rendent nécessaire la construction de nouvelles infrastructures, ce qui est généralement très coûteux pour les communes responsables de ces réseaux. Pour limiter le nombre de nouvelles infrastructures, on cherche à gérer de façon optimale les capacités de traitement de pollution par une meilleure utilisation des infrastructures existantes (bassin de rétention, déversoir…). Un « pilotage optimal » des ouvrages au cours d'un événement pluvieux suppose la mise en place de tout un système d'acquisition d'information en temps réel des variables d'état du système (pluie, niveaux, débit …) et des organes de contrôle (J.Vazquez et al, 2003).

C'est dans ce contexte qu'est apparue alors l'idée de doter les réseaux d'un fonctionnement dynamique capable de compenser les manques dus à l'autorégulation passive. Ce fonctionnement dynamique est obtenu par le biais d'ouvrages de régulation pilotés par un agent humain ou par un automate. Le pilotage s'effectue grâce à l'acquisition de données en temps réel et par l'utilisation de processus prévisionnels et/ou décisionnels.
Cette approche est renforcée par une évolution des règlements visant à la protection du milieu naturel. L'évolution de la réglementation relative aux rejets urbains de temps de pluie, et particulièrement la directive européenne du 21 Mai 1991 et la loi sur l'eau du 3 Janvier 1992 renforcée par les arrêtés du 22 Décembre 1994 et du 22 juin 2007, impose un choix rigoureux des améliorations possibles des dispositifs (chambre de tranquillisation, pompe, grilleur, vanne…) avec comme objectif la réduction de l'impact des rejets sur les milieux récepteurs. La gestion en temps réel permet donc non seulement d'optimiser l'efficacité d'un réseau d'assainissement (en termes de volumes d'eaux non traitées déversées dans le milieu naturel), mais elle évite aussi de nombreux surcoûts en matière de construction d'ouvrages (Ricard, 1994), (J.Vazquez et al, 2003).
Les outils actuels de gestion en temps réel des réseaux s'appuient sur deux outils logiciels : les logiciels de prévision météorologique et les logiciels de simulation hydraulique. L'usage des premiers est une cause importante d'imprécision et d'incertitude (Petit et al, 2000), l'usage des seconds oblige à des pas temporels de décision importants qui peuvent atteindre plus que 24 heures, du fait de leur besoin en temps de calcul (Darsono, 2006) (Vazquez et al, 1997). Cette façon de procéder fait qu'il est quasiment impossible de gérer les erreurs et imprévus avec pour corollaire une diminution des objectifs en termes d'optimisation des capacités de rétention et de minimisation des rejets au milieu naturel. Une première tentative fructueuse a déjà été testée en 2003 (Khorchani et Blanpain, 2004).
L'idée maîtresse présentée ici est de changer de paradigme de base en abordant la problématique par la face « automatique » plutôt que par celle « hydrologie ». L'objectif est de rendre possible la réalisation d'un grand nombre de simulations en des temps très courts (quelques secondes) permettant une grande réactivité et le test d'un grand nombre de solutions. Ainsi, il est possible de se passer des prévisions météorologiques en utilisant directement les données pluviométriques recueillies en temps réel par les pluviographes du site et en utilisant comme temps décisionnel le temps de ruissellement de l'eau. La rapidité du temps de calcul permet aussi en fonction des données recueillies en temps réel sur le réseau, de corriger les erreurs ayant pu être commises au pas de temps de calcul précédent. A chaque pas, la décision est prise à partir de données fiables et la correction de l'erreur est permanente. Une première tentative basée sur la réduction du temps de calcul et l'usage unique de données mesurées a déjà été testée en 2003 (Khorchani et Blanpain, 2004). Elle a donné de très bons résultats mais elle ne concernait la gestion que d'un seul actionneur. Il s'agit ici d'aller beaucoup plus loin en permettant la gestion d'un grand nombre d'actionneurs (plusieurs dizaines).

Nous proposons dans cet article une nouvelle approche de gestion dynamique des réseaux d'assainissement qui permet à la fois de minimiser les rejets vers le milieu naturel mais surtout le temps de calcul.
Avant tout, nous présentons un modèle mathématique continu représentant le fonctionnement du réseau d'assainissement sur lequel pourront être appliquées ensuite des lois de commande puis la validation de ce modèle.
Nous allons dans un premier temps décrire le contexte du projet et la modélisation retenue pour les principaux ouvrages rencontrés dans un réseau (bassins versants, bassins d'orages). Dans un deuxième temps, après avoir validé le modèle continu utilisé, nous détaillerons la nouvelle approche de gestion proposée ainsi que les résultats obtenus sur une simulation d'un réseau test fictif.

2 LE PROJET CARDIO

CARDIO de son nom Conception d'un Assainissement, Régulé, Dynamique et Intelligent en Ostrevent, est un projet de recherche en ingénierie urbaine qui a été créé afin de répondre à la nécessité de la protection environnementale des milieux récepteurs de la communauté de communes de cœur d'Ostrevent (CCCO) en minimisant les rejets d'eaux pluviales non traitées tout en maintenant le niveau de protection contre les inondations. L'objet du projet est de réaliser des outils permettant d'utiliser au mieux les données issues de l'auto-surveillance afin d'élaborer des processus de gestion dynamique optimisés. Le terrain d'étude est le réseau d'assainissement de la commune de Somain sur une durée de projet de trois ans (2012-2014).
L'objet de la prestation est de concevoir un système de pilotage adapté à la gestion dynamique des réseaux d'assainissement. Ainsi, à partir du modèle existant du réseau, on construit un modèle conceptuel adapté à la mise en place des nouveaux actionneurs. Ce modèle permettra de mettre en place une commande globale qui gèrera le fonctionnement du réseau global en fonction du temps tout en agissant sur les différents points de contrôle locaux (les seuils de déversement, les pompes, les limiteurs de débit…) en tout ou rien. La décision sera prise en tenant compte de l'état de chaque actionneur de façon simultanée et globale.

3 LE RESEAU D'ASSAINISSEMENT

Le réseau d'assainissement est un ensemble de conduites souterraines, ponctuées d'ouvrages. A l'exutoire de ceux-ci, est souvent installée une station d'épuration. C'est un objet étendu et complexe dans lequel de nombreux éléments interviennent (Bassin de stockage, égouts, déversoir d'orage, collecteurs ….) (Figure 1). On peut agir sur le réseau et le réguler, soit par automa-

tismes sur certains actionneurs (pompes, ouvrage de traitement, vannes, déversoirs d'orage mobiles…), soit en agissant à distance sur ces actionneurs (Ricard,1994), (Vazquez et al, 2003).

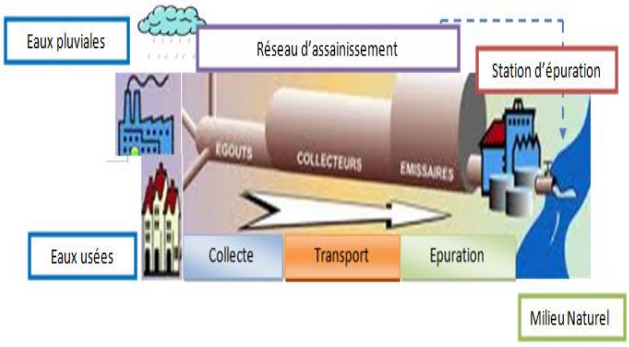

Figure 1: Cycle de l'eau en milieu urbain, ses principaux éléments et son processus.

Les ouvrages d'assainissement ont pour objectif d'assurer la collecte, le transport, la rétention des eaux usées et pluviales, et de procéder à leur traitement avant rejet dans le milieu naturel. Pour rendre cette tache possible, Le réseau d'assainissement se dote de moyens techniques et organisationnels. Selon Bruno Ricard (Figure2), le réseau d'assainissement peut être divisé en parties contrôlables et d'autres non contrôlables:

- Parties non contrôlables : Les bassins versants produisent un débit et des concentrations en polluants non contrôlables en fonction de la pluie (Ricard, 1994).
- Parties contrôlables : Le réseau reçoit des volumes d'eau et des masses de solide provenant des basins versants. Il les stocke et les achemine au milieu naturel soit directement par les déversoirs soit en passant par la station de traitement (Ricard, 1994) Chocat, 1997) (Khorchani, 2003). Il s'agit de phénomènes contrôlables puisqu'un changement dans la configuration des déversoirs ou dans le régime de pompage peut modifier les sorties.

C'est sur ces parties contrôlables que nous pouvons agir pour gérer le fonctionnement du réseau.
Nous pouvons agir sur les dispositifs de régulation du débit soit en tout ou rien TOR soit en continu et ceci en :

- Mettant une porte devant le seuil du déversement afin de contrôler l'ouverture des déversoirs en fonction de la hauteur d'eau en amont du seuil.
- Mettant une vanne devant le limiteur de débit et le faire fonctionner en fonction de la hauteur d'eau dans le bassin.
- Faisant tourner la pompe en fonction du niveau de l'eau dans le bassin.

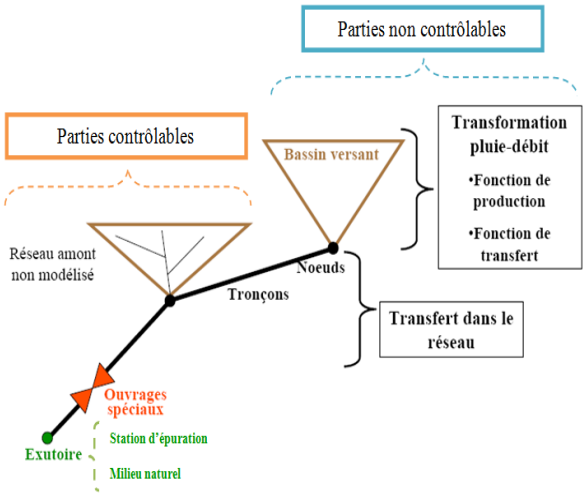

Figure 2: Les principaux éléments d'un réseau d'assainissement (Ricard, 1994)

Nous proposons dans un premier temps une approche de gestion globale des réseaux d'assainissement basée sur une autorégulation des actionneurs locaux en tout ou rien que nous présenterons dans cet article puis dans un deuxième temps une commande continue (c'est l'objet de nos études actuelles).

Il s'agit de mettre en œuvre une commande temps réel tout ou rien d'un système multi-variable (plusieurs entrées et plusieurs sorties) non linéaire. Pour résoudre le problème d'optimisation des rejets, on s'appuie sur un algorithme de prédiction des écoulements des eaux de pluie et sur un modèle mathématique simplifié du réseau. La commande étant générée à chaque période d'échantillonnage de durée faible devant la dynamique du système, celle-ci est constamment corrigée en fonction de l'évolution réelle du système et doit ainsi permettre un meilleur rejet des perturbations.
Le développement d'un système de supervision des réseaux d'assainissement sur la base d'une commande tout ou rien est venue de l'idée que les actionneurs implantés dans la plupart des réseaux sont commandés de cette manière, ou manuellement sans système de régulation. Implanter une commande qui ne remet pas totalement en question les systèmes de commande bas niveau des réseaux tels qu'ils existent permet d'envisager de réduire les coûts de mise en place de notre démarche.

Tout au long de cet article, nous utiliserons un réseau test fictif décrit au paragraphe 4.4 pour expliciter notre approche et les résultats en découlant. Afin d'étudier la pertinence de l'approche proposée nous la testons dans un premier temps sur les pluies de projets de période de retour un, deux cinq et dix et sur une série chronologique de 16 années de pluie réelle.

Une pluie de projet est une pluie fictive créée faute de données pluviométriques (Elle varie en fonction de la région pluviométrique). Cette dernière a été calculée à partir des données hydrologiques conformes à un modèle préétabli et telle qu'il est théoriquement possible d'associer une période de retour. Elle est caractérisée par sa durée totale, son intensité maximale, la durée de sa période pluie intense et ses coefficients de Montana. Les coefficients de Montana caractérisent la pluviométrie d'une région. Ces coefficients sont définis par météo France pour différents temps de retour.
Une pluie décennale est une pluie de période de retour égale à dix ans.

Dans ce qui suit, nous allons détailler les différentes parties d réseaux d'assainissement (bassins versants et bassins de rétention).

4 MODELISATION DU RESEAU

La première étape dans l'étude et le contrôle d'un processus est le développement d'un modèle mathématique. Le modèle mathématique comprend un ensemble d'équations qui décrivent le comportement du processus, et à partir de ce modèle nous pouvons calculer l'évolution temporelle des grandeurs internes du processus (le volume de stockage, la hauteur d'eau, le débit sortant, ...).

La modélisation des réseaux d'assainissement représente un aspect très important vue la complexité de ces derniers. En effet, les réseaux d'assainissement sont des systèmes dynamiques complexes (l'eau coule à travers les égouts dans des canaux ouverts). Généralement, le débit dans les canaux ouverts sont décrits par des équations aux dérivées partielles de Saint-Venant qui peuvent être utilisées pour réaliser des études de simulation, mais sont très complexes à résoudre en temps réel.
Plusieurs approches de modélisation ont été présentées dans la littérature dont la plupart sont en temps discret et sont trop complexes à résoudre pour une utilisation en temps réel avec des temps de calcul trop élevés qui peuvent atteindre plus que 24 heures. (Darsono, 2006) (Vazquez et al, 1997).
Le modèle mathématique du réseau peut être déterminé en utilisant:
• La façon déductive, en utilisant les lois connues de la physique qui décrivent les aspects pertinents du réseau étudié, comme par exemple l'équation de continuité. Dans le cas d'un réseau d'assainissement, le modèle qui se déduit de cette manière est appelé le modèle hydraulique ou hydrodynamique (Béron et Richard, 1982).

• La façon inductive, en utilisant des résultats expérimentaux (valeurs d'entrée-sortie) qui caractérisent indirectement le comportement du processus.

• Une combinaison des deux approches mentionnées précédemment (Béron et Richard, 1982), (Marinaki et Papageorgiou 2005).

Nous présentons dans cet article un modèle simple continu qui reflète le fonctionnement réel du réseau d'assainissement.
Nous nous sommes basés essentiellement sur les modèles hydrauliques proposés par Carlier et Chocat (Carlier, 1998), (Chocat, 1997) et les modèles mathématiques proposés par Papageorgiou (Marinaki et Papageorgiou, 2005).

4.1 Formulation du problème

La plupart des phénomènes hydrologiques d'un réseau d'assainissement peuvent être modélisés par les modèles de réservoir (Blanpain, 2004).
Le modèle du réservoir linéaire est une fonction de transfert largement utilisée en hydrologie urbaine du fait de sa grande simplicité, de son faible nombre de paramètres (un seul) et de ses bonnes performances.
Ces modèles sont issus de la dynamique des systèmes. Ils permettent de tenir compte de l'effet de stockage du réservoir. On les représente schématiquement sous forme d'un réservoir dont la loi de vidange est une fonction de stockage (Figure 3).

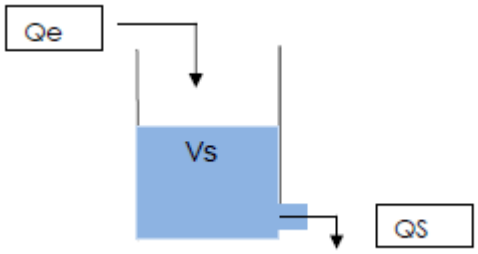

Figure 3: Représentation physique d'un modèle de réservoir

Ces derniers sont fondés sur l'équation de continuité :

$$\frac{dVs(t)}{dt} = Qe(t) - Qs(t) \qquad (1)$$

Et sur une loi de stockage:

$$Vs(t) = f(Qe(t), Qs(t), t) \quad . \qquad (2)$$

Où Vs indique le volume stocké, t le temps, Qe le débit entrant et Qs le débit sortant, (Carlier, 1998), (Chocat, 1997).
Ils ont la particularité d'être particulièrement robustes et très stables numériquement. C'est cette famille de modèles que nous utiliserons par la suite pour l'ensemble du réseau.

4.2 Bassin versant

Un bassin versant est considéré comme un réservoir recevant un débit net de pluie Qe(t).
Pour modéliser la transformation pluie-débit nous utiliserons la formulation du réservoir linéaire suivante :

$$\frac{dVs(t)}{dt} = Qe(t) - Qs(t) \quad (3)$$

Et

$$Vs(t) = K1 \times Qs(t) \quad (4)$$

Avec : $Qe(t) = C \times A \times i(t)$ (5)

C : le coefficient de ruissellement, A : la surface du bassin versant, i(t) : l'intensité pluvieuse,Qe(t) : le débit entrant du bassin versant, Qs : le débit sortant du bassin versant, Vs : le volume stocké K1 : le temps de réponse du bassin versant. Ce paramètre détermine le délai entre les pics de précipitation du hyétogramme observé (hyétogramme : courbe représentant l'intensité de la pluie en fonction du temps) et les pics correspondant dans l'hydrogramme calculé (hydrogramme : courbe représentant la variation temporelle du débit) (Carlier, 1998).

4.3 Les réservoirs ou les ouvrages spéciaux

Parmi les ouvrages spéciaux, nous nous intéressons plus particulièrement aux bassins de rétention/déversoir d'orage. La modélisation des ouvrages spéciaux s'appuie naturellement sur les modèles de réservoir.

$$\frac{dVs(t)}{dt} = Qe(t) - Qs(t) - Qsdeb(t) \quad (6)$$

Avec : Qe : le débit entrant, Qs : le débit sortant du réservoir, Qsdeb : le débit de débordement, Vs : le volume de stockage.

Si le niveau d'eau dans le réservoir dépasse la hauteur de ce réservoir, l'eau va déborder avec un débit noté Qsdeb. (Carlier, 1998), (Marinaki et Papageorgiou, 2005).

4.3.1. ***Définition***

Un déversoir d'orage est un ouvrage permettant le stockage et le transport des eaux non traitées vers le milieu naturel, soit directement, soit en passant par la station d'épuration. Il joue un rôle hydraulique en fonction du débit amont:

- **En temps sec ou petites pluies**, il protège le milieu naturel en renvoyant ultérieurement les eaux non traitées vers la station d'épuration.
- **En temps de forte pluie**, il protège contre les inondations. En effet, pour éviter les inondations il renvoie les eaux non traitées vers le milieu naturel directement. Si le niveau d'eau dans le bassin d'orage dépasse la hauteur maximale du bassin, des inondations peuvent se produire. La figure 4 représente des inondations en pleine rue dues à la montée d'eau non maitrisée au niveau du bassin de stockage.

Figure 4: Exemple de débordement

4.3.2. ***Le seuil de déversement***

Les seuils de déversement sont prioritairement installés sur des bassins de rétention et les ouvrages séparatifs d'assainissement pour permettre le déversement de grosses quantités lors d´importantes précipitations.
La formule suivante (Formule de Poleni) s´applique au calcul du débit de déversement:
Si $H(t) > Hdé$

$$Qsdév(t) = ms \times \sqrt{(2 \times g)} \times L \times (H(t) - Hdév)^{(3/2)} \quad (7)$$

Sinon $Qsdév(t) = 0$ (8)

Avec ms: coefficient de crête du seuil, g : accélération de pesanteur, L : la longueur du seuil, H(t) : hauteur d'eau, Hdév : la hauteur du seuil de déversement, Qsdév(t) : le débit au seuil du déversoir. (Carlier, 1998), (Marinaki et Papageorgiou, 2005).

4.3.3. **Orifice, ajutages et vannes**

Un ajutage est un orifice calibré dont la forme et les dimensions sont choisies de façon à réguler le débit en fonction de la charge hydraulique.
Les ajutages et les vannes donnent un débit limité mais non constant puisque fonction de la charge, donc de la hauteur de remplissage du réservoir. En pratique ils seront néanmoins suffisants dans la grande majorité des cas pour assurer le service souhaité. Ils nécessitent toutefois une protection, une surveillance et un entretien réguliers.

Le débit écoulé à travers un orifice (placé dans le fond ou les parois d'un réservoir) est donné par la formule générale : (loi de Toricelli)

$$Qsaj(t) = ma \times S \times \sqrt{(2 \times g \times (H(t) - Ha)} \quad (9)$$

Avec :

$$H(t) = \frac{1}{A} \times Vs(t) \quad (10)$$

A : la surface du bassin de rétention, ma : coefficient de forme, S : section de l'orifice, g : accélération de pesanteur, H(t) : hauteur d'eau, Qsaj : le débit à l'ajutage, Qe : débit d'entrée, Vs : le volume stocké, Ha : la hauteur de l'ajutage (Ha=0 si l'orifice est placé au fond du réservoir). (Carlier, 1998), (Marinaki et Papageorgiou, 2005).

4.3.4. Régulateurs et limiteurs

Le régulateur ou le limiteur de débit permet d'assurer un débit de fuite constant en sortie d'un ouvrage de stockage, par exemple d'un bassin de rétention. Les dimensions et caractéristiques de ces appareils sont choisies pour répondre aux contraintes hydrauliques fixées (hauteur d'eau, débit de fuite admissible à l'aval, nature des effluents…).

4.4 Description du réseau test

Pour valider notre approche nous sommes partis dans un premier temps sur la modélisation et la commande d'un réseau fictif de type pluvial dans lequel nous avons simulé cinq actionneurs de type tout ou rien : trois seuils de déversement, une pompe et un limiteur de débit. Le réseau est composé par cinq éléments : deux bassins versants et trois ouvrages de rétention. Le premier ouvrage de rétention BR1 dispose de deux exutoires (i.e. sorties): le premier est un limiteur de débit qui rejette dans le troisième bassin de rétention BR3. Le second est un seuil de déversement qui déverse vers un deuxième ouvrage de rétention BR2. Ce deuxième ouvrage de rétention dispose de deux exutoires : le premier est un seuil de déversement qui déverse directement vers le milieu naturel (i.e cours d'eau). Le deuxième est une pompe qui rejette dans le troisième ouvrage de rétention BR3. Ce dernier dispose également de deux exutoires : le premier est un seuil de déversement qui déverse directement vers le milieu naturel. Le second est un limiteur de débit qui renvoie l'eau dans la station d'épuration STEP. La structure ainsi que le paramétrage du réseau test sont explicités sur la figure 5.

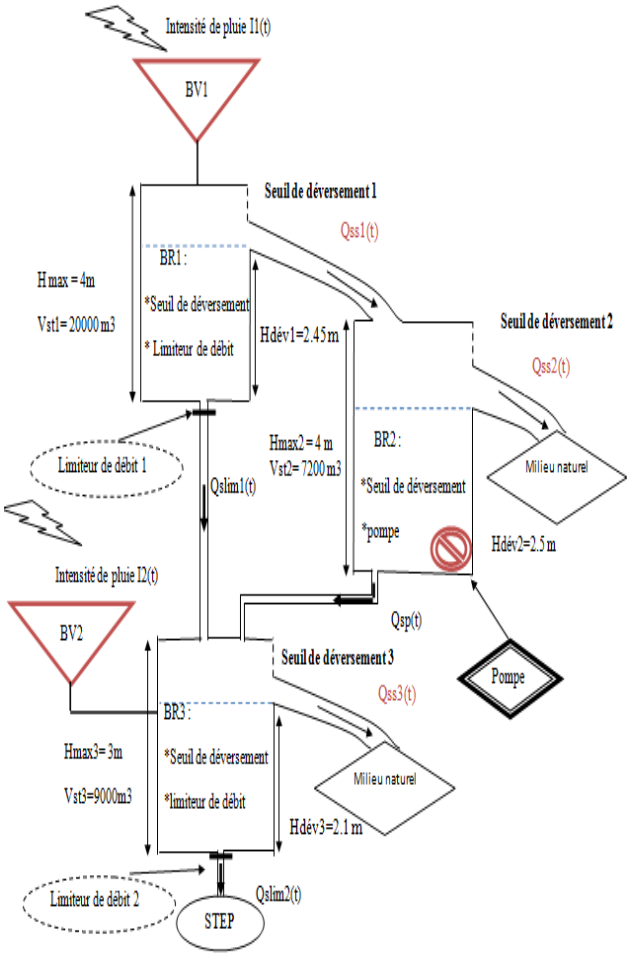

Figure 5: Structure et paramètres du réseau test sans actionneurs

Avant d'appliquer les lois de commande, un modèle continu pour la simulation du réseau test sous Matlab a été réalisé, calé puis validé.
Le modèle est calé (les valeurs de ses paramètres tels que k, ms, ma, L etc.… ont été déterminées) de telle sorte qu'il n'y ait pas de débordement pour une pluie décennale. En hydrologie urbaine, on fait toujours le calage des réseaux d'assainissement par rapport à une pluie décennale (c'est la pluie la plus intense des quatre pluies de projet annuelle, biannuelle, quinquennale et décennale).

5 LE SYSTEME DE PILOTAGE

L'objet principal de l'approche proposée est l'obtention de manière automatique de la solution optimale permettant de minimiser les rejets dans le milieu naturel tout en gardant le même niveau de protection contre les inondations.

Ceci peut être obtenu par exemple :
• en exploitant au maximum les capacités de stockage du réseau afin de limiter les débordements et la saturation de la station de traitement en cas de fortes pluies.

• en vidant le réseau dès que possible vers la station de traitement dès que les conditions le permettent.

Pour ce faire, nous pouvons agir au moyen d'actionneurs « tout ou rien » sur les trois déversoirs (ouverture ou fermeture des seuils), sur le limiteur de débit du BR1 (fermeture ou ouverture) et sur la pompe (marche ou arrêt). Il s'agit donc d'un fonctionnement binaire des actionneurs. Si nous avons N actionneurs, nous aurons 2^N combinaisons (ou scénarios) possibles pour agir sur les actionneurs du réseau. Ici, nous avons 5 actionneurs (les trois seuils de déversement, le limiteur de débit et la pompe) donc 2^5 =32 combinaisons possibles.

Pour déterminer la solution optimale (pas de débordement et minimisation des déversements), deux cas peuvent se présenter :

- 1er cas : pas de débordement, la solution optimale est donnée par le scénario qui permet de minimiser les rejets dans le milieu naturel (VMN minimal).
- 2ème cas : cas de débordement, la solution optimale est celle qui permet de minimiser le volume de débordement (dans ce cas, on ouvre tous les actionneurs pour vider le réseau rapidement).

A chaque pas de temps de décision (le pas de temps est égal à 5 min), à partir des données pluviométriques reçues, nous recherchons dans l'ensemble de toutes les combinaisons d'actions (2^N) celle qui est la plus pertinente pour l'horizon prévisionnel suivant. Cette recherche s'effectue en simulant le fonctionnement du réseau sur un horizon de prévision flottant p (p= 30 minutes dans notre cas). Sur cet horizon sont effectuées des prévisions sur les données pluviométriques qui permettent d'estimer les rejets dans le milieu naturel avec une simulation du réseau. Le modèle de prévision utilisé est un modèle de prévision linéaire. Les prévisions sont construites à partir des données pluviométriques mesurées à l'instant t et d'une courbe de tendance pour extrapoler les données sur l'horizon flottant.
En hydrologie urbaine, le pas de temps peut varier de 2 à 6 minutes. Nous avons utilisé un pas de temps de 5 mn (le plus utilisé d'ailleurs), car pour le projet CARDIO, le temps d'acquisition des données est égal à 5 mn.

La figure 6 montre les différentes étapes du processus d'optimisation.

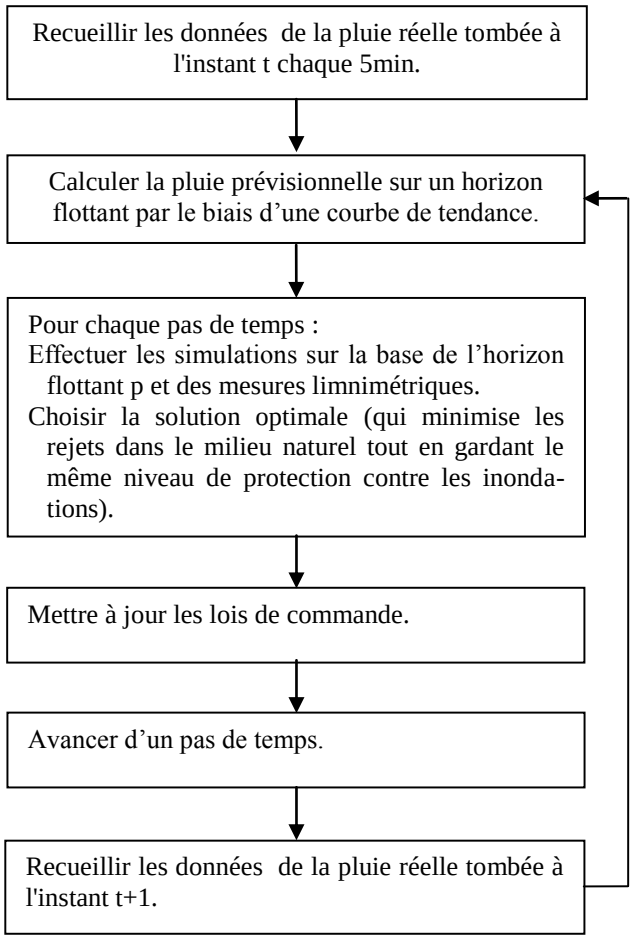

Figure 6: Etapes de l'approche proposée

6 TESTS EXPERIMENTAUX

Afin de tester la pertinence de cette approche nous faisons varier dans un premier temps la période p de l'horizon flottant de prévision pour le modèle de prévision linéaire (Tableau 1) puis dans un deuxième temps nous comparons les résultats obtenus par le modèle de prévision linéaire par rapport à ceux obtenus par un modèle de « prévision exacte » (Tableau 2).
<u>Le modèle de « prévision exacte » :</u>
Nous partons de l'idée que nous connaissons l'évolution réelle de la pluie (prévision=réalité, donc pas d'erreur).
Nous présentons dans le tableau 1et 2 les résultats de la simulation obtenus pour une pluie décennale.

Période p	P=15 mn	P=30 mn	P=60 mn	P=120 mn
Volume total de pluie final (m3)	54383.06	54383.06	54383.06	54383.06
Volume total rejeté dans le MN final (m3)	21134.87	20965.20	20803.47	20803.47
Volume total traité	32357.37	32528.61	32690.35	32690.35
Temps de simulation pour 500 pas de temps (mn)	19	20	24	26

Tableau 1: Résultat obtenus pour les différentes périodes p (modèle de prévision linéaire)

Nous remarquons que plus l'horizon p augmente, plus on va anticiper la montée des eaux (les modèles de pluies utilisées sont linéaires) et plus on améliore la prévision jusqu'à une certaine limite ici p=60 mn.
Le modèle de prévision sur un horizon de 30 mn a permis à la fois de minimiser les rejets dans le milieu naturel avec des temps de simulation raisonnables, ce qui explique le choix de la période p=30 minutes pour nos expérimentations suivantes.

	Volume total de pluie final (m3)	Volume total rejeté dans le MN final (m3)	Volume total traité (m3)
Modèle de prévision exacte	54383.06	20807	32685.9
Modèle de prévision linéaire	54383.06	20965.20	32528.61
Ecart entre les deux modèles (%)	_	0.75	0.48

Tableau 2: Résultats obtenus pour les deux modèles de prévision.

Afin de mesurer en quelque sorte la qualité du modèle prévisionnel linéaire utilisé, on calcule l'écart en pourcentage entre les deux modèles (Tableau 2). L'écart de volume rejeté dans le milieu naturel est égal à 0.75%. Ainsi nous pouvons valider le modèle de prévision linéaire simple.

Le processus d'optimisation mis en place ne se base que sur des mesures de terrain (pluviographes et limnigraphes). L'avantage est qu'il ne peut donc y avoir d'incertitude sur les données d'entrée contrairement aux systèmes utilisant des prévisions météorologiques. L'inconvénient est que cette approche proposé ne peut être appliqué que si les temps de calcul sont inférieurs à ceux d'acquisition des données, ce que nous allons démontrer.
Afin de généraliser cette approche proposée, nous l'avons testé sur quatre pluies test de période de retour 1, 2, 5 et 10 ans, nous obtenons les gains en volume rejeté suivants : 100 % (respectivement de 100%, 42% et 22%) pour une pluie annuelle (respectivement biannuelle, quinquennale et décennale).
Les résultats obtenus par la mise en place des lois de commande ainsi que les gains obtenus sont les suivants (Tableau 3).

Type de pluie	VMN Total Avec commande (m3)	VMN Total sans commande (m3)	Gain obtenu (%)
Annuelle	0	150	100
Biannuelle	0	2200	100
Quinquennale	8298	14306	42
Décennale	20965.2	27158	22

Tableau 3: comparaison des volumes déversés au milieu naturel (VMN) sur le réseau test avec et sans commande

Dans le cas présenté ci-dessus, le temps de calcul pour une itération est d'un peu plus de 2 secondes pour simuler les 25 combinaisons issues des 5 actionneurs. Cela répond à notre problématique mais pourtant ce n'est pas aussi satisfaisant qu'il y paraît. En effet, l'algorithme d'optimisation utilisé fait que le temps de calcul suit une loi puissance en fonction du nombre d'actionneurs utilisés (Figure 7). Par exemple si pour un actionneur le temps de calcul est d'une seconde alors il sera d'environ 6 jours pour un système avec 20 actionneurs.

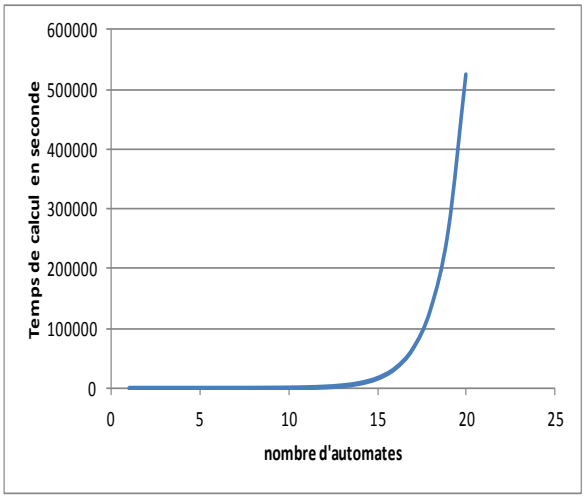

Figure 7 : temps de calcul en fonction du nombre d'actionneurs

Pour résoudre le problème de temps de calcul, nous avons élaboré une heuristique de type recherche locale. Cette heuristique est basée sur un voisinage de taille linéaire avec le nombre d'actionneur. Elle permet de suivre une loi linéaire du temps de calcul en fonction du nombre d'actionneurs (Figure 8). Ainsi, si pour un actionneur le temps de calcul est d'une seconde alors il est de 20 secondes pour 20 actionneurs.
Cette heuristique permet d'explorer le champ des possibles sans être obligé de tester toutes les combinaisons pour trouver une solution de bonne qualité voire optimale.
(L'heuristique en question n'est pas publiable car soumis à un règlement de propriété industrielle).

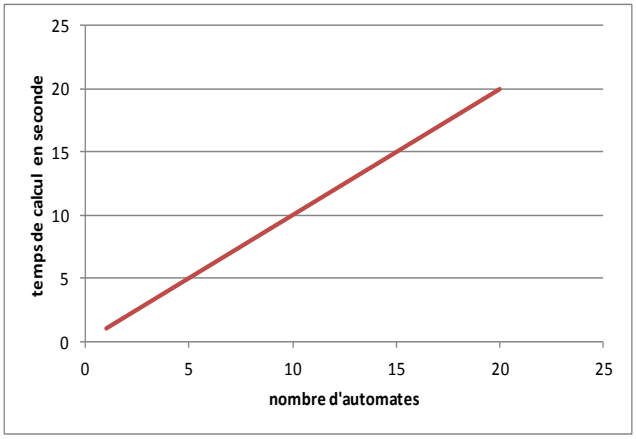

Figure 8 : temps de calcul en fonction du nombre d'actionneurs (l'heuristique)

Dans nos tests, le temps de calcul pour une itération est d'une demi-seconde pour 5 actionneurs soit une vitesse d'exécution 4 fois plus rapide que le précédent algorithme exhaustif. Nous pouvons aussi remarquer que le gain de performance en temps de calcul ne dégrade quasiment pas les gains en déversement (Tableau 4).

Type de pluie	VMN Total Modèle exhaustif (m3)	VMN Total Recherche locale (m3)	Ecart (%)
Annuelle	0	0	_
Biannuelle	0	0	_
Quinquennale	8298	8584	3.33
Décennale	20965.2	21463	2.31

Tableau 4 : comparaison des volumes déversés au milieu naturel (VMN) sur le réseau test avec et sans commandes (nouvel algorithme)

La perte d'efficacité est nulle pour les pluies annuelles et biannuelles et minimes pour les pluies quinquennales et décennales.

Nous appliquons l'heuristique proposée à une série chronologique de 16 années de pluies (mars 1988 à décembre 2004), ce qui va nous permettre de calculer le gain moyen sur une période de 16 années et non seulement pour un seul événement pluvieux. Nous obtenons les gains de 65 % en nombre de pluies qui ont provoqué des rejets dans le milieu naturel et de 40% en volume rejeté (Tableau 5).

	Avec commande	Sans commande	Gain obtenu (%)
Nombre de pluies qui ont provoqué de rejets dans le MN	43	122	65
Volume total rejeté (m3)	288089	475c992	40

Tableau 5: gain en déversements pour une série chronologique de 16 années de pluie

Ce nouvel algorithme permet donc de réaliser une réelle optimisation même avec un grand nombre de variables de décision (ici les actionneurs). Pour donner une idée de l'efficacité de l'algorithme mis en place, le temps de calcul pour 100 actionneurs est de 10 secondes et est donc inférieur au temps de recueil des informations pluviométriques ou limnimétriques. Le temps de calcul d'optimisation n'est de ce fait plus pénalisant et permet d'adapter en continu les stratégies de commande en fonction des mesures de terrain.

7 CONCLUSION

L'ensemble des expériences menées dans le domaine de la gestion dynamique des réseaux d'assainissement repose sur l'usage de logiciels de simulation hydraulique sur lesquels viennent se greffer des commandes d'automates. À cause des temps de calcul trop importants, il est quasiment impossible, de réaliser des calculs visant à une optimisation réelle de l'usage des capacités de rétention et donc de la minimisation des rejets non traités au milieu naturel. Nous proposons ici un changement de paradigme : prendre la problématique abordée par la face « automatique » plutôt que par celle « hydrologie ». Cette nouvelle approche permet de prendre les décisions à partir de données fiables et d'être en mesure de corriger en continu les stratégies de commande en fonction de l'erreur mesurée entre modélisation et mesures de terrain. N'étant pas basée sur des scénarios préconçus, elle permet aussi de renforcer la robustesse du pilotage du réseau.

REMERCIEMENTS

Le projet CARDIO est financé par la Communauté de Communes de Cœur d'Ostrevent (CCCO), l'Agence de l'Eau Artois Picardie (AEAP) et IXSANE société d'études et d'ingénieurs conseils en ingénierie urbaine et environnementale. Il est mis en œuvre par IXSANE avec la participation des Laboratoire de Génie Civil et géo Environnement (LGCgE) et Territoires Villes Environnement et Société (TVES) de l'Université Lille 1 et le Laboratoire de Génie Informatique et d'Automatique de l'Artois de l'Université d'Artois (LGI2A).

REFERENCES

Blanpain O, 2004. *An original model for sewerage network simulation using the stock concept. Fifth international conference on Innovative Technologies in Urban Storm Drainage Novatech*, Lyon, France, Juin 2004, pp.1009-1016.

Béron P, Richard D, 1982. *Simplified Routing in Combined or Storm Interceptors. Urban Drainage Systems, Proc of the 1st Int Seminar, Featherstone RE, James A (eds.)* Southampton 2-67-76

Carlier M, 1998. *Hydrauliques générales et appliqué., EDITION EYROLLES 61,* Bd Saint-Germain Paris 5e 1972. ISSN 0399-4198.

Chocat B. (1997). - *Ouvrage collectif. Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement*. Ed. Lavoisier Tec & Doc, 1124 p. ISBN : 2743001267.

Khorchani M, 2003. *Apports de l'imagerie numérique et de l'approche connexionniste à l'analyse de fonctionnement, la modélisation et la gestion des déversoirs d'orage*. Thèse de doctorat. Laboratoire de Mécanique de Lille (L.M.L.), France.

Khorchani M. and Blanpain O, 2004. *A new concept implementation for overflow structures monitoring and modelling". Fifth international conference on Innovative Technologies in Urban Storm Drainage Novatech*, Lyon, France, Juin 2004, pp. 539-546.

M. Marinaki, M. Papageorgiou, 2005. *Optimal Real-time Control of Sewer Networks,*
— *advanced in industrial control.* series ISSN 1430-9491 ISBN 1-85233-894-6.

Petit L. Blanpain O., Le Gouevec J., 2004. *Inaccuracy of the data or uncertainty of the models ?". Fourth International Conference on Hydroinformatics*, Iowa city, USA, Juillet 2000, CD-Rom.

Ricard B, 1994. *Comment éviter de polluer et d'inonder à tort ? Apports de l'expérimentation numérique et intégration dans un processus d'apprentissage sur un réseau d'assainissement réel.* Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon INSA, France.

Darsono S, Labadie John W. (2006), Neural-optimal control algorithm for real-time regulation of in-line storage in combined sewer systems, Environmental Modelling & Software 22 (2007) 1349e1361

Vazquez J., François M., Gilbert D, 2003. *Gestion en temps réel d'un réseau d'assainissement: Vérification de l'optimalité et de l'applicabilité de la théorie des graphes par rapport à la programmation linéaire mixte. Revue des sciences de l'eau.* Vol. 17, no 5, p 425-442.