MODELISATION DU RESEAU UNITAIRE DU DISTRICT DE NANTES VERS UNE MEILLEURE MAITRISE DES REJETS POLLUANTS PAR TEMPS DE PLUIE.

F. GOURDET, A. GAUTHIER
SAUNIER Eau et Environnement

RESUME

Cette communication présente, sous un angle méthodologique, la modélisation du réseau unitaire du District de Nantes entreprise dans le but de limiter les pollutions physico-chimique et bactériologique en regard des contraintes de protection de la Chézine et de l'Erdre intra-muros, et des exigences de protection de la qualité de l'estuaire de la Loire.

L'article décrit dans ses grandes lignes l'étude telle qu'elle a été menée, à l'aide de modèles classiques, sur la rive-Nord de la Loire. Il met l'accent sur les résultats obtenus en termes d'éléments pour le choix et le dimensionnement de nouveaux aménagements.

1. INTRODUCTION

La modélisation de la partie unitaire du réseau d'assainissement du District de Nantes s'inscrit dans une étude générale que nous avons réalisée. Cette réflexion complète, conduite par un Groupement conjoint de bureaux d'Ingénieurs Conseils, à savoir la S.E.T. PRAUD et le Cabinet SAUNIER Eau et Environnement, avait pour objet, d'une part, de déterminer les flux de pollution transités dans le réseau d'assainissement de l'agglomération nantaise, et d'autre part, d'évaluer l'impact sur les milieux récepteurs, en particulier de la future station d'épuration de Tougas sur l'estuaire de la Loire.

Cette modélisation vise une répartition globalement optimale de la pollution urbaine par temps de pluie, entre déversements directs au milieu naturel et survolumes acceptés en phase épuratoire sur le réseau d'assainissement et/ou la station d'épuration.

Le schéma général d'approche des solutions s'identifie à la boucle classique :

PROPOSITION	EVALUATION	SOLUTION
	MODIFICATION	

Il s'appuie sur un ensemble de simulations successives faisant suite au choix et à l'application des modèles adaptés au contexte et à la finalité de l'étude. En référence à ce schéma global de résolution, nous mettons en œuvre la démarche suivante :

En phase « propositionnelle », les écoulements simulés sont ceux consécutifs à des pluies de projet définies sur la base d'une analyse, sur l'aire d'étude, des pluies de fréquence courante. En tenant compte des débits et des flux déversés, on aboutit à un réglage initial des déversoirs d'orage en fonction des fréquences imposées par le contexte normatif et les contraintes d'acceptabilité du milieu naturel. Les résultats de ces simulations de première phase guident ainsi le choix, la localisation et le prédimensionnement des organes de régulation.

En phase d'évaluation, c'est une étude statistique des déver-

sements du réseau unitaire et de son comportement global qui est menée au moyen de simulations de séries de précipitations isolées, réellement observées sur plusieurs années (près de vingt ans à Nantes). On dispose ainsi d'un panel d'indicateurs permettant de juger du rendement probable, à terme, de la restructuration proposée et de sa valeur au vu des objectifs visés.

2. OUTIL DE SIMULATION

La version 3.01 du logiciel MOUSE a été utilisée pour simuler les écoulements consécutifs aux pluies observées ou aux hyéto-grammes de projet définis sur l'aire d'étude. Ce logiciel du Danish Hydraulic Institute, francisé et commercialisé en France, permet d'aborder les aspects hydrologique et hydraulique de la modélisation des réseaux d'assainissement ainsi que l'étude des charges polluantes rejetées au milieu récepteur.

2.1. MODULE HYDROLOGIQUE

Le calcul du ruissellement de surface peut être mené, soit par la méthode dite des courbes aire-temps ou formule rationnelle généralisée, soit avec un modèle qui requiert une description très détaillée des bassins versants et fait appel à l'équation à exponentielle décroissante de HORTON pour le calcul de l'infiltration.

2.2. MODULE HYDRAULIQUE

Le calcul de l'écoulement en réseau peut se faire selon trois niveaux de précision, à savoir :

- calcul simplifié de l'onde cinématique ne prenant en compte que les forces de frottement et de gravité pour approcher le débit ;
- calcul de l'onde diffusante ;
- résolution du système complet de Barre-De-Saint-Venant.

2.3. MODULE DE CALCUL DE CHARGES POLLUANTES

Ce module, connu sous l'appellation de SAMBA, est destiné à l'étude statistique des déversements d'un réseau unitaire basée sur les simulations de longues séries de précipitations isolées s'étalant, de préférence, sur plusieurs années. Le modèle permet ainsi d'obtenir une charge annuelle moyenne pour les substances polluantes qui s'accumulent avec le temps, et les valeurs statistiques extrêmes pour les charges non persistantes, mais dont une occurrence peut causer des dommages importants.

2.4. OUTILS COMPLEMENTAIRES

Il n'existe pas à l'heure actuelle en France de base de hyéto-grammes adaptée à l'approche statistique que nous venons d'évoquer. Aussi, avons-nous mis au point une méthode d'exploitation des dépassements des seuils de précipitations de la Météorologie Nationale, pour la reconstitution d'événements pluvieux destinés au module SAMBA.

Pour traiter par ailleurs ces centaines de pluies dans des limites de temps acceptables, SAMBA introduit au préalable des simplifications dans le sous-système de transport de l'eau et au niveau de la modélisation de la structure physique du réseau, y compris des organes de régulation ; stations de pompage et

déversoirs d'orages sont modélisés en mode tout ou rien et à débit constant. Ces schématisations sont menées de manière à minimiser, à l'échelle de plusieurs années, leur part d'incidence finale sur les valeurs restituées. Elles rendent cependant SAMBA inapte à traiter, en relation avec le sous-système hydraulique, le processus de transfert de pollution pour un événement pris isolément. Cela nous a conduit à développer un autre module qualité, capable de se réapproprier les résultats des modules hydrologique et hydraulique de MOUSE pour une évaluation plus correcte des flux déversés.

3. SIMULATIONS DE PREMIERE PHASE

Après l'analyse des pluies de fréquence courante, les hydrogrammes de ruissellement résultant de hyétoigrammes, représentatifs à Nantes de ces petites pluies, sont établis aux exutoires des différents bassins versants. La propagation des apports à travers les conduites est ensuite simulée en tenant compte des organes de régulation. Le calcul des flux polluants déversés s'effectue alors sur la base de ces résultats, par réassociation d'un pollutogramme élémentaire aux hydrogrammes de ruissellement sur chaque bassin versant.

Ces simulations ne peuvent évidemment être lancées qu'après la description préalable du réseau modélisé et une phase de calage.

3.1. LE RESEAU

Compte-tenu de sa finalité, la modélisation a concerné les collecteurs principaux de transfert longeant les cours d'eau récepteurs (figure 1) :

- les collecteurs des rives droite et gauche de l'Erdre,
- le collecteur Chézine,
- le collecteur de l'Est et l'émissaire général-Nord situés sur la rive droite de la Loire.

Le tableau 1 synthétise les principales caractéristiques de ces collecteurs.

Tableau 1 : Caractéristiques de ces collecteurs.

COLLECTEUR	LINEAIRE (km)	PENTE MOYENNE pour mille	SECTION MOYENNE (m ²)	CAPACITE (m ³)
EST	6,1	1,1	2,2	13 500
ERDRE RD	2,0	1,4	2,4	4 800
ERDRE RG	1,3	0,8	2,2	2 800
CHEZINE	3,9	1,4	2,1	8 000
EMISSAIRE	7,0	0,4	5,0	35 000

3.2. CARACTERISTIQUES DES BASSINS VERSANTS

L'aire d'étude s'étend sur près de 10.000 hectares en rive droite de la Loire. Elle a été découpée en une trentaine de grands bassins versants afin d'identifier progressivement et d'affiner, par calage, les apports respectifs au réseau des différents secteurs. Cette partition reste en conformité avec les objectifs de l'étude ; elle a été menée de manière à permettre l'exploitation adéquate des sous-secteurs principaux d'apports, sur lesquels ont été réalisées des mesures de charges sanitaires et de flux polluants en période pluvieuse. Les points adoptés comme exutoires de ces bassins de collecte sont schématisés à la figure 1 où apparaissent également leurs caractéristiques « permanentes ». Les apports pluviaux aux secteurs eaux usées des zones séparatives, témoignant de mauvais raccordements, ont été globalisés en différents points d'injection de la structure unitaire.

Les coefficients d'imperméabilisation pris en compte dans la modélisation hydrologique ont été évalués à partir des mesures en continu réalisées au printemps 1992, en aval immédiat des sous-bassins versants élémentaires considérés. En effet, l'occurrence de quelques pluies significatives et leur mise en correspondance avec les surdébits par rapport aux volumes de temps sec, a permis de quantifier les surfaces totalement imperméabilisées raccordées. Ces surfaces ont été affinées par calage au moyen de coefficients, dits de « restitution au réseau unitaire », variant autour de 0,85 (cf. paragraphe 5.32.).

4. ECOULEMENTS ET TRANSFERT DE POLLUTION

4.1. PLUIE-DEBIT

Cette transformation est conduite au moyen du logiciel MOUSE, par une des variantes de la méthode rationnelle généralisée basée sur la notion de courbes aire-temps. Une courbe aire-temps liée à l'allure globale d'un bassin versant d'aire A permet de définir le rapport (Surface active)/A en fonction du rapport (Instant de calcul)/(Temps de concentration) : il y a identité entre ces deux rapports dans l'approche rationnelle classique.

Qu'il s'agisse d'une reconstitution de pluie réelle en phase de calage ou d'un hyétoigramme de projet créé à partir de coefficients de MONTANA spécifiques à Nantes, à chaque pas de temps, la donnée I(t) est exploitée pour l'obtention du débit à l'exutoire, selon l'expression :

$$Q(t) = (Sa/A)t \cdot C_{imp} \cdot C_r \cdot I(t) \cdot A$$

où dans cette relation :

- I(t), est l'intensité de la pluie nette pendant le pas de temps ;
- Cr, est un coefficient de réduction pris ici pour le coefficient de restitution au réseau unitaire ;
- Cimp, le coefficient d'imperméabilisation du bassin versant ;
- A, la surface totale du bassin.

(Sa/A)t est la part de la surface contribuant au ruissellement pendant le pas de temps courant. Sa valeur est déterminée à l'aide de la courbe aire-temps qui correspond au bassin modélisé. Cette correspondance s'effectue selon que la forme du bassin suggère un acheminement de front, globalement divergent ou un acheminement convergent des eaux ruisselées.

Notons que nous disposions d'observations en nombre suffisant pour « jauger » les bassins versants, en cerner les comportements hydrologiques propres et, tout en manipulant un nombre restreint de paramètres, déboucher sur une très bonne adéquation avec le réel comme nous le montrons plus loin.

4.2. CALCUL DES ECOULEMENTS EN CONDUITE

Afin de décrire l'ensemble des forces pouvant affecter les conditions d'écoulement et de prendre en compte, notamment, les influences aval localisées sur le réseau modélisé, les écoulements ont été établis au moyen de module de calcul dit de « l'onde dynamique » du logiciel MOUSE, mettant en œuvre la résolution des équations complètes de Barre-de-Saint-Venant. Le critère ayant déterminé ce choix est la volonté de disposer d'une bonne évaluation de la hauteur d'eau, étant donné son rôle prépondérant de paramètre d'entrée dans la modélisation des déversoirs.

Figure 1 : Schématisation de l'ossature unitaire modélisée sur la rive-Nord du district de Nantes.

4.3. CALCUL DES FLUX DEVERSES

Les flux polluants déversés au milieu récepteur : Chézine, Erdre et Loire, sont estimés au moyen d'un module qualité développé par SAUNIER Eau et Environnement, en réappropriant les conditions d'écoulements, en surface et en réseau, générées

par le logiciel MOUSE, et en introduisant un pollutogramme associé à l'hydrogramme de ruissellement sur chaque bassin versant.

Au niveau de chaque déversoir, l'hydrogramme incident et l'hydrogramme de décharge sont exportés de MOUSE. Les concentrations pluviales sont calculées en relation avec le ruis-

sellement sur les bassins versants d'origine. Au niveau d'un bassin versant particulier, la concentration d'un polluant est donnée par une valeur moyenne dont la variation éventuelle au cours du ruissellement peut être approchée dans le modèle à partir d'une courbe (Masse cumulée/Masse totale) — (Volume ruisselé cumulé/Volume ruisselé total) donnée a priori.

5. CALAGE DU MODELE

Opéré par fixation des principaux paramètres hydrauliques, hydrologiques et de pollution, ce calage découle finalement :

- de la confrontation interprétée des hauteurs d'eau simulées, et des hauteurs mesurées correspondantes pour des épisodes pluvieux réellement observés ;

- de l'exploitation des relevés concomitants de cette pluviométrie d'une part, et de débits et de flux polluants sur les sous-secteurs principaux d'apports d'autre part ;

Les démarches suivantes ont, par conséquent, précédé le calage proprement dit :

- la reconstitution théorique de la série des pluies observées du 5 mars 1992, reconstitution rendue possible par l'exploitation des mesures recueillies sur l'ensemble des pluviographes de l'aire d'étude pendant cette période ;

- le dépouillement des mesures limnigraphiques effectuées toutes les quatre minutes pendant cette même période, par un dispositif informatisé placé au droit des principaux ouvrages de surverse ;

- la reconstitution en bruit de fond des conditions hydrauliques de temps sec, et du bilan des charges polluantes collectées sur le réseau d'assainissement de la rive-Nord du District de Nantes, bilan issu de la campagne de mesures de mars 1992.

5.1. RECONSTITUTION DES CONDITIONS HYDRAULIQUES ET DES FLUX POLLUANTS DE TEMPS SEC

L'interprétation des mesures de débits en continu dans les réseaux d'assainissement a permis de déterminer, d'une part, les volumes strictement sanitaires transités actuellement et d'autre part les volumes d'eaux parasites d'infiltration, collectés par le réseau d'assainissement, en période de nappes phréatiques basses et hautes. En mars-avril 1992, deux séries de bilans des charges polluantes transitées en 24 heures ont eu lieu en plusieurs points du réseau d'assainissement. La mise en correspondance des concentrations avec les débits hydrauliques mesurés aux mêmes points, a conduit à estimer les flux polluants à injecter aux exutoires des bassins modélisés.

Cette approche aboutit aux valeurs de concentrations polluantes habituellement admises dans les effluents sanitaires urbains. Pour les secteurs ou sous-bassins versants à caractère industriel plus marqué, on observe des valeurs sensiblement plus élevées.

5.2. RECONSTITUTION DES PLUIES OBSERVEES

Il a été essentiel, pour la phase de calage, de recréer certaines des pluies observées pendant la période où des hauteurs d'eau en réseau ont été relevées en continu, en exploitant la pluviométrie journalière enregistrée par l'ensemble des pluviographes répartis sur le District de Nantes, soit onze au total.

5.3. LES PARAMETRES CALES

Estimés, dans un premier temps, sur la base d'un savoir-faire manipulant un nombre important d'éléments difficilement pondérables, les paramètres affinés préférentiellement en phase de calage sont principalement, au plan hydrologique, les coefficients de restitution à la structure unitaire modélisée et les temps de concentration des différents bassins versants et, plus classiquement, les différentes pertes de charges singulières, au plan hydraulique.

5.3.1. Temps de concentration

Dans la phase initiale du calage, les temps de concentration sont prédéterminés par une formule empirique choisie pour sa simplicité et son adéquation aux grands bassins versants. Les temps de concentration finalement retenus l'ont été sur la base des ajustements résultant de la maîtrise, relativement à ces paramètres, des variations des débits simulés pour les épisodes pluvieux réellement observés jusqu'à obtention des allures des hydrogrammes issus des mesures.

5.3.2. Coefficients de restitution au réseau unitaire

Pour ces paramètres définis au paragraphe 4.1., ce ne sont plus les allures des hydrogrammes qui ont servi au calage mais bien directement les hauteurs d'eau mesurées. Cela se justifie par le fait que les écoulements générés en réseau par les précipitations ayant contribué au calage, n'ont pas investi les collecteurs sur des plages où leurs lois hauteur-débit cessent d'être biunivoques.

D'une manière générale, le critère retenu pour témoigner d'un bon calage est la minimisation des écarts entre limnigrammes simulés et limnigrammes mesurés aux points de suivi permanents, mis en place sur les déversoirs d'orage à seuil mobile du réseau unitaire du District de Nantes. Le dispositif informatisé existant sur chacun de ces sites, est équipé de capteurs de niveau permettant d'enregistrer toutes les quatre minutes la cote des rivières : Erdre, Chézine et Loire, et les niveaux d'effluent dans les collecteurs à l'amont immédiat des vannes mobiles ainsi que la position de ces dernières.

La figure 2 montre, pour un de ces points, l'évolution chronologique des niveaux mesurés et simulés obtenus consécutivement à la pluie tombée le 26 mars 1992 de 0 heure à 6 heures entre Boissière et Beaumanoir.

5.3.3. Paramètres de pollution

Ils ont pu être ajustés, dans une certaine mesure, à l'aide de la quantification des charges polluantes s'échappant des déversoirs d'orage : les quinze points plus importants de surverse ont fait l'objet de prélèvements pour analyses physico-chimiques des paramètres suivants : DCO, DBO5, MES, NK et pH. Les résultats de ce suivi apparaissent à la figure 3. Trois polluto-graphes, établis par temps de pluie sur les déversoirs mobiles de Saint-Mihiel (Erdre), Bouhier (Chézine) et Tougas (Loire), ont également apporté de précieux éléments de comparaison, et permis de vérifier que l'on accédait, par la modélisation, aux ordres de grandeur des flux réellement déversés.

Pour la pollution pluviale stricte, des prélèvements et des analyses réalisés en 1990 par la Société SAUNIER Eau et Environnement, en plusieurs sites urbains d'une agglomération du Grand-Ouest de la France, aboutissent à la caractérisation suivante :

Figure 2 : Niveaux mesurés et simulés à Cordon Bleu (DO-27) pour la pluie du 26/03/1992 de 0 h à 6 h entre Beaumanoir et Boissière.

Figure 3 : Quantification de la pollution s'échappant des principaux déversoirs d'orage de la rive-Nord du district de Nantes.

Paramètre analysé	Première moitié du ruissellement	Totalité du ruissellement
MES (mg/l)	210	120
DCO (mg/l)	140	100
DBO5 (mg/l)	30	20
Plomb (mg/l)	0,04	---
CT (ULog/100 ml)	5	---

— MES :	150 mg/l
— DCO :	100 mg/l
— DBO5 :	20 mg/l
— NK :	4 mg/l
— Phosphore total :	1 mg/l

En l'absence de données spécifiques à l'agglomération nantaise, les valeurs retenues pour la pollution des eaux du ruissellement pluvial sont les suivantes :

Une légère variation de ces concentrations au cours du ruissellement a été prise en compte comme indiqué au paragraphe 4.3.

Figure 4 : Comparaison entre les pollutogrammes simulés en entrée de la station d'épuration pour une pluie de fréquence mensuelle.

6. SIMULATION DES ECOULEMENTS ET DES FLUX POLLUANTS

Après la phase de calage du modèle, des simulations effectuées à partir des résultats de l'étude des pluies courantes, développée sur la base des populations de données pluviométriques de Bouguenais, ont permis d'analyser la réponse globale du réseau à des hyétogrammes fictifs uniformes de différentes durées, compte tenu de la méthode de transformation Pluie-Débit utilisée, pour une large gamme de fréquences.

Le choix de la pluie de référence conditionné, d'une part par l'acceptabilité du milieu récepteur et, d'autre part par le contexte normatif, a été opéré par scrutation de la grille de résultats ainsi obtenue. La figure 4 présente, pour cette pluie simulée, les pollutogrammes en entrée de la station d'épuration pour la situation actuelle et deux scénarii de restructuration :

— déversements non autorisés sur la Chézine et l'Erdre pour la pluie de référence et les pluies plus fréquentes ;

— mise en place d'un collecteur de ceinture schématisé sur la figure 1, traduisant la déconnexion de la structure unitaire d'environ 10 % de la surface totale imperméabilisée sur la zone modélisée.

CONCLUSION

Pour le choix et le dimensionnement de nouveaux aménagements ayant un rendement épuratoire correct à l'échelle de l'Agglomération Nantaise, et surtout, dans le calage des ouvrages de régulation à répartir sur le réseau, la modélisation a joué un rôle utile, voire indispensable, de support de réflexion et d'action à engager, afin de mieux appréhender et de corriger le réel, en permettant de contrôler le mécanisme de répartition de la pollution véhiculée. On s'achemine, à Nantes, vers une meilleure prise en charge de la pollution grâce au futur Centre Intercommunal de dépollution des eaux de Tougas, mais également vers une meilleure maîtrise des rejets polluants par temps de pluie. Dans cette optique, la modélisation permet de raisonner en terme de rendement global de l'assainissement sur une grande agglomération.

HYPOCRAS : UN MODELE CONCEPTUEL DE TRANSPORT SOLIDE EN RESEAU D'ASSAINISSEMENT PAR TEMPS DE PLUIE

J.-L. BERTRAND-KRAJEWSKI
CIRSEE — Lyonnaise des Eaux-Dumez

RESUME

Un modèle conceptuel et global de la production et du transfert des solides en réseau d'assainissement unitaire a été élaboré. Il est destiné aux petits bassins versants urbanisés de moins de 100 ha. Le modèle simule de manière simple l'ensemble des phénomènes, et prend en compte deux types de particules : des particules fines transportées en suspension, et des particules plus grosses transportées en suspension ou en charriage selon les conditions hydrauliques. Ces particules plus grosses sont

également constitutives des dépôts dans les collecteurs. Le modèle a été calé et vérifié sur trois bassins versants différents, avec des résultats satisfaisants.

1. INTRODUCTION

De plus en plus, la pollution des rejets urbains par temps de pluie et leur impact sur le milieu récepteur sont pris en compte dans les schémas d'assainissement. Dans ce contexte, et pour mieux comprendre les phénomènes et prévoir les ouvrages à construire, le développement de modèles de simulation est un axe de recherche important en hydrologie urbaine, et une attention particulière est accordée à la modélisation du transport solide dans les réseaux [BERTRAND-KRAJEWSKI et al., 1993]. En effet, les solides sont la cause de nombreux problèmes [ASHLEY et al., 1990], [LAPLACE, 1991], [CHEBBO 1992] :

— dépôts dans les collecteurs qui sont susceptibles d'être érodés partiellement ou totalement durant les pluies et qui entraînent des surverses plus fréquentes au droit des déversoirs ;

— particules en suspension qui sont le vecteur essentiel de la pollution, notamment en ce qui concerne la DCO et les métaux lourds.

Le modèle HYPOCRAS (Hydrogrammes et Pollutogrammes Calculés en Réseau d'Assainissement), établi en collaboration avec l'E.N.I.T.R.T.S. à Strasbourg, représente une contribution à ce domaine d'étude, en proposant une modélisation globale de la production et du transfert des solides à l'échelle de bassins versants de moins de 100 ha équipés de réseaux unitaires.

2. DESCRIPTION SOMMAIRE DU MODELE

Il s'agit simplement de rappeler ici les principales caractéristiques du modèle, une description complète ayant déjà été effectuée par ailleurs [BERTRAND-KRAJEWSKI, 1992].

Deux modules parallèles permettent de représenter les phénomènes par temps de pluie dans le modèle HYPOCRAS (figure 1) :

— un module hydrologique et hydraulique, qui calcule l'hydrogramme à l'exutoire du réseau,

— un module de transfert des solides, qui calcule le pollutogramme à l'exutoire et l'évolution des dépôts dans les collecteurs.

Le module hydrologique et hydraulique est très simple. La pluie brute, sous forme de hyétogrammes enregistrés avec des pas de temps de 1 à 5 minutes, est transformée en pluie nette après calcul des pertes initiales et continues. La transformation pluie — ruissellement — débit à l'exutoire est simulée en une seule étape par une cascade de deux réservoirs linéaires. Le débit pluvial ainsi calculé est ajouté au débit de temps sec du réseau pour déterminer le débit total à l'exutoire. Cette approche globale et simplifiée des phénomènes est acceptable à l'échelle de petits bassins versants de moins de 100 ha et conduit à des résultats satisfaisants.

Le module de production et de transfert des solides est plus complexe. L'accumulation des solides à la surface du bassin versant est décrite par la relation classique de l'accumulation asymptotique en fonction du temps proposée initialement dans le modèle américain SWMM (Storm Water Management Model). L'érosion des solides par la pluie et leur entraînement par le ruissellement sont représentés en une seule étape, en admettant que la masse arrivant au réseau d'assainissement est directement proportionnelle à la masse de solides accumulés et à l'intensité de la pluie nette.