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.

Figure 1 : Schéma général du modèle HYPOCRAS.

Avant l'arrivée dans le réseau, au niveau des avaloirs, on distingue deux classes de particules dont les caractéristiques ont été choisies en fonction des données disponibles dans la littérature. Cette distinction permet de séparer les particules les plus grosses ($d_{50} = 400 \mu\text{m}$), essentiellement minérales (densité = 2,6), qui constituent les dépôts et qui sont majoritairement transportées par charriage, et les particules fines ($d_{50} = 40 \mu\text{m}$), à la fois organiques pour celles des eaux usées (densité = 1,1 à 1,8) et minérales pour celles transportées par le ruissellement (densité = 2,4 à 2,6), d'où une densité moyenne prise égale à 2, majoritairement transportées en suspension et qui véhiculent l'essentiel de la pollution.

Après passage dans les avaloirs où une rétention et un tri sélectif des particules peuvent se produire, on suppose que chacune des deux classes de particules représente 50 % en masse du flux total de solides.

L'érosion des dépôts présents dans les collecteurs est supposée directement proportionnelle à la masse de dépôts et au débit. Le calcul se fait par l'intermédiaire d'un coefficient d'é-

rosion différent pour chacune des deux classes de particules, afin de tenir compte de leur facilité plus ou moins grande à être érodées.

La somme des flux de particules provenant du ruissellement de surface, de l'érosion des dépôts et des eaux usées permet de déterminer une concentration initiale CI pour la suite des calculs, et ce à chaque pas de temps. L'ensemble du réseau d'assainissement étudié est représenté par un seul collecteur fictif équivalent, dont le diamètre est le diamètre du collecteur réel à l'exutoire et dont la pente est la pente moyenne des collecteurs pondérée par les longueurs. Ce collecteur équivalent n'a pas de longueur définie : le temps de transit des solides le long du réseau est simulé par le « lag-time » d'un réservoir linéaire de transfert (voir plus loin).

La capacité de transport CT de l'écoulement à travers le collecteur équivalent est déterminée au moyen du modèle de WIUFF [WIUFF, 1985]. Ce modèle a été adapté pour prendre en compte différentes classes granulométriques. Il a été choisi pour trois raisons principales :

— il n'introduit pas de paramètres supplémentaires dans le modèle ;

— il a une formulation mathématique simple, et donc des temps de calculs courts ;

— il permet, avec les mêmes formulations, de calculer le transport total et le transport en suspension : par différence, on obtient le transport par charriage.

Si la concentration initiale CI est supérieure à la capacité de transport CT , les particules les plus grosses sédimentent les premières. L'équilibre entre capacité de transport, concentration transportée et sédimentation est calculé à chaque pas de temps par un processus itératif. Si la concentration initiale CI est inférieure ou égale à la capacité de transport CT , alors toutes les particules sont transportées sans sédimentation. Dans les deux cas, la répartition entre suspension et charriage est déterminée d'après le modèle de WIUFF modifié.

Le transfert des particules en suspension et des particules transportées par charriage le long du réseau est simulé par le transfert à travers un réservoir linéaire, dont le lag-time est calé de telle sorte qu'il représente, indirectement, le temps de transit des solides à travers l'ensemble du réseau.

A l'issue de ces calculs, le modèle HYPOCRAS fournit les résultats suivants :

- le pollutogramme de la concentration en solides en suspension,
- la masse totale transportée par charriage au cours de l'épisode pluvieux,
- la variation des masses de dépôts pour chacune des classes granulométriques.

3. RESULTATS DES SIMULATIONS

Le modèle HYPOCRAS a été testé et validé sur trois bassins versants aux caractéristiques différentes : Mantes-la-Ville, Entzheim et Dundee (voir tableau 1). Tous sont équipés de réseaux unitaires et présentent une urbanisation de type résidentiel peu dense. Les principaux résultats obtenus font l'objet des paragraphes suivants.

3.1. RESEAU DE MANTES-LA-VILLE

La campagne de mesure effectuée par le L.R.O.P. en 1978-1979 [LAVEUF et al., 1980] a permis de retenir 6 épisodes pluvieux après critique et validation des données disponibles. Trois épisodes ont servi au calage des paramètres. Sans modifier les valeurs des paramètres, les trois autres épisodes pluvieux ont permis de vérifier l'aptitude du modèle HYPOCRAS à reproduire les observations. Un exemple de résultats est donné figure 2.

Les résultats fournis par le modèle sont satisfaisants. L'ensemble des pollutogrammes est bien simulé, et les charges en solide en suspension calculées correspondent bien aux charges

Figure 2 : Mantes-la-Ville, pluie du 17/10/1978.

mesurées. Le transport par charriage est très faible (entre 1 et 4,3 kg de solides par épisode pluvieux), mais est cohérent avec les observations : en effet, LAVEUF et al. (1980) ont noté que le réseau ne contenait pas de dépôts, en raison des fortes pentes toujours supérieures à 1 %.

Les simulations réalisées avec HYPOCRAS ont permis de retrouver ces observations : les simulations ont toutes été réalisées avec une masse initiale de dépôts nulle, et aucune sédimentation n'a lieu durant l'épisode pluvieux. Compte tenu des fortes pentes et des débits importants, l'énergie disponible est toujours suffisante pour maintenir la majeure partie des solides en suspension. Ces premiers résultats ont permis de valider les approches utilisées dans le modèle.

Tableau 1 : Caractéristique des bassins versants.

bassin versant	Mantes-la-Ville	Entzheim	Dundee
superficie (ha)	72	40	81
imperméabilisation	0,39	0,39	0,40
pente moyenne (m/m)	0,0318	0,002	0,025
habitants	4800	1650	2500

3.2. RESEAU d'ENTZHEIM

Contrairement au réseau de Mantes-la-Ville, le réseau d'Entzheim est très plat, et contient des dépôts très importants dont la formation est facilitée par la présence de nombreuses contre-pentes [ERTIERES, 1987]. Les études menées sur ce site entre 1986 et 1988 par l'E.N.I.T.R.T.S. [BELLEFLEUR, 1989] ont permis, après critique et validation des données disponibles, de retenir 8 épisodes pluvieux pour tester le modèle.

La figure 3 représente l'épisode pluvieux n° 22 du 3 mai 1987. Cet épisode est particulièrement intéressant en raison de sa durée (plus de 9 heures) et des pics de pluie successifs. L'hydrogramme est reproduit de manière tout à fait satisfaisante par le modèle. Sur le pollutogramme calculé, et en conservant les mêmes valeurs des paramètres pour les pluies successives, les pics de concentration successifs et décroissants sont simulés avec une assez bonne précision. On notera qu'ils présentent une sensibilité marquée vis à vis des pointes d'intensité de la pluie. Un épisode pluvieux aussi long et complexe que celui-ci permet de tester les capacités du modèle et le bien fondé des approches et du niveau de description proposés. Les résultats obtenus sont encourageants.

Le charriage, durant cet épisode pluvieux reste faible (1,1 kg au total), et correspond à une sédimentation importante des particules les plus grosses : 65 kg de grosses particules ($d_{50} = 400 \mu m$) se sont déposés durant l'épisode pluvieux. A l'inverse,

Figure 3 : Entzheim, pluie du 03/05/1987.

il n'est pas possible de reproduire le pollutogramme si l'on ne fait pas intervenir l'érosion des dépôts fins. Ainsi, 36 kg de particules fines ($d_{50} = 40 \mu m$) ont été érodés durant la pluie. Les solides présents à l'exutoire sont donc majoritairement des particules fines, ce qui corrobore les observations.

L'ensemble de ces résultats, ainsi que ceux obtenus pour les 7 autres épisodes pluvieux, permettent de retrouver les observations faites in situ, à savoir :

- une augmentation des dépôts de grosses particules après chaque pluie, en raison des capacités de transport limitées du réseau,
- une érosion des dépôts constitués de particules fines lors des épisodes pluvieux, ces particules fines sédimentant durant les périodes de temps sec. La partie temps sec du modèle HYPOCRAS a permis de modéliser cette sédimentation, et de retrouver par la simulation numérique les observations de terrain.

3.3. RESEAU DE DUNDEE

Le bassin versant Upper Perth Road à Dundee en Ecosse a fait l'objet de campagnes de mesure importantes concernant les solides transportés et les dépôts dans les collecteurs [ASHLEY et al., 1989-1990]. Les données mises à notre disposition par R. ASHLEY du Dundee Institute of Technology nous ont permis de sélectionner 8 épisodes pluvieux pour nos simulations.

Les résultats obtenus sont satisfaisants, tant pour les hydrogrammes que pour les pollutogrammes [ASHLEY et BERTRAND-KRAJEWSKI, 1993]. Un exemple de simulation est donné figure 4.

Contrairement à Mantes-la-Ville et à Entzheim, les résultats sont variables selon les épisodes pluvieux : dans certains cas, il y a accroissement des dépôts, dans d'autres cas il y a érosion et diminution des dépôts de grosses particules. De manière plus générale, les dépôts restent stables, ce qui confirme les observations faites sur site. De même, l'érosion de particules fines n'est pas systématique pour reproduire les pollutogrammes des solides en suspension : cela correspond à la variabilité intrinsèque des phénomènes, et correspond également aux observations montrant que les dépôts présents dans les collecteurs sont essentiellement composés de grosses particules.

Le charriage est plus important que dans les deux autres sites : il représente 5 à 7 % du transport total. A Dundee, seul des trois sites étudiés où des évaluations du charriage ont été réalisées, les valeurs mesurées sont du même ordre de grandeur que les résultats des calculs.

4. FONCTIONNEMENT DU MODELE ET ANALYSE DE SENSIBILITE

Une première analyse de sensibilité a permis de mieux comprendre l'influence des divers paramètres sur le fonctionnement du modèle et les résultats des calculs. Trois groupes de paramètres peuvent être identifiés. Par ordre croissant de sensibilité sur les résultats, on trouve les paramètres relatifs au réseau proprement dit :

- les paramètres relatifs au bassin versant,
- les paramètres de conditions initiales.

Il est possible d'en déduire quelques pistes pour l'utilisation du logiciel :

- en l'état actuel du modèle et des connaissances, un calage site par site reste indispensable. Il faut donc pouvoir disposer de mesures expérimentales ;
- les paramètres liés au bassin versant et au réseau peuvent être calés assez rapidement en se fondant sur une série de 4 ou 5 épisodes pluvieux correctement enregistrés ;
- les paramètres représentant les conditions initiales jouent un rôle déterminant dans le calcul des charges rejetées, et notamment sur les valeurs des pics de concentration. Or leur éva-

Figure 4 : Dundee pluie du 05/06/1989.

luation reste très délicate et incertaine : évaluer la masse de solides accumulés à la surface d'un bassin versant est un problème extrêmement difficile, et les techniques de mesure ou d'évaluation font cruellement défaut. De même, l'évaluation des dépôts susceptibles d'être érodés est très complexe : la mesure du dépôt total ne permet ni de distinguer particules fines et particules grossières ni d'évaluer la fraction mobilisable lors d'un épisode pluvieux donné. Or cette fraction mobilisable peut être très faible comparée à la masse totale de dépôts : ainsi, à Entzheim et à Dundee, il y a plusieurs tonnes de dépôts dans les collecteurs, mais la masse mobilisable n'est que de quelques dizaines ou centaines de kilogrammes pour chaque pluie. La localisation et le déplacement des zones de dépôts [BACHOC, 1992] posent également des problèmes importants.

La détermination des conditions initiales nécessite une connaissance approfondie du réseau et des conditions antérieures de fonctionnement. En définitive, les rejets lors d'un épisode pluvieux particulier dépendent de toute l'histoire du réseau.

5. CONCLUSION

HYPOCRAS est un modèle conceptuel simple qui simule les phénomènes principaux du transfert des solides en réseau

unitaire, pour des bassins versants inférieurs à 100 ha. Il distingue entre les particules fines transportées en suspension et les particules plus grosses constitutives des dépôts et qui sont transportées en suspension ou par charriage selon les conditions hydrauliques. Bien qu'il mette en œuvre des descriptions globales et simplifiées, HYPOCRAS donne des résultats d'une précision satisfaisante, notamment pour les pollutogrammes des solides en suspension. Les charges transportées par charriage sont généralement faibles, mais les mesures de terrain sont encore trop peu nombreuses pour valider correctement le modèle sur ce point.

Les résultats obtenus pour trois bassins versants sont encourageants, et des développements ultérieurs sont envisagés :

- prise en compte des données les plus récentes concernant les caractéristiques des solides transférés en réseau d'assainissement : granulométrie, vitesse de chute et densité [CHEBBO, 1992] ;
- couplage des modules de temps sec et de temps de pluie pour utiliser le modèle en vue de simulations sur de longues durées, par exemple pour évaluer les flux rejetés à l'échelle annuelle ;
- extension du modèle à des bassins versants plus grands, en lui adjoignant un module de transfert pour relier entre eux plusieurs sous-bassins.

BIBLIOGRAPHIE

- ARTIERES O. — Les dépôts en réseau d'assainissement : origines, caractéristiques, pollution, transport. Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg, 1987, 214 pages.
- ASHLEY R.M., BERTRAND-KRAJEWSKI J.L. — Sewer sediment origins and transport in small catchments. 6th ICUSD, Niagara Falls, september 1993, 6 pages.
- ASHLEY R.M., COGHLAN B.P., CRABTREE R.W. — Sewer sediments : their occurrence, movement and polluting potential. IWEM meeting, january 1990, 35 pages.
- ASHLEY R.M., COGHLAN B.P., JEFFERIES C. — The quality of sewage flows and sediment in Dundee. 2nd Wageningen Conference, CHO/IAWPRC/IAC, september 1989, 8 pages.
- BACHOC A. — Le transfert des solides dans les réseaux d'assainissement unitaires. Thèse de doctorat de l'ENPC, Paris, novembre 1992, 290 pages.
- BELLEFLEUR D. — Suivi d'un réseau d'assainissement unitaire : synthèse de deux campagnes de mesure. Tech. et Sc. Municipales, 1989, n° 11, pp. 561-572.
- BERTRAND-KRAJEWSKI J.L. — Modélisation conceptuelle du transport solide en réseau d'assainissement unitaire. Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg, avril 1992, 205 pages.
- BERTRAND-KRAJEWSKI J.L., BRIAT P., SCRIVENER O. — Sewer sediment production and transport modelling : a literature review. Journal of Hydraulic Research, 1993 (sous presse).
- CHEBBO G. — Solides des rejets urbains par temps de pluie — Caractérisation et traitabilité. Thèse de doctorat de l'ENPC, Paris, mars 1992, 410 pages.
- LAPLACE D. — Dynamique du dépôt en collecteur d'assainissement. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, janvier 1991, 202 pages.
- LAVEUF L., PHILIPPE J.P., RANCHET J. — Bassin versant urbanisé de Mantes-la-Ville : étude de la pollution véhiculée par les eaux de ruissellement en réseau unitaire. Rapport Labo. Rég. des Ponts-et-Ch. de l'Ouest-Parisien, n° FAER 1.08.06.7/1.67.11.7, Trappes, juillet 1980, 45 pages.
- WUOFF R. — Transport of suspended material in open channel and submerged streams. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 111, 1985, n° 5, pp. 774-792.