FLUPOL

Modèle de prévision des débits et des flux polluants en réseaux d'assainissement par temps de pluie

Calage et validation

G. Bujon * et L. Herremans **

1. Introduction

Le ruissellement pluvial urbain est considéré depuis de nombreuses années comme une des sources de dégradation importante des milieux récepteurs, notamment dans les zones les plus fortement urbanisées.

Ainsi n'est-il pas rare d'observer dans les cours d'eau, après des épisodes pluvieux de type orageux, des baisses notables de la teneur en oxygène dissous, teneur pouvant atteindre la limite critique entraînant des mortalités piscicoles.

Les effets de la pollution engendrée par ces eaux sont particulièrement aigus dans les zones à fort niveau d'imperméabilisation, dans celles dont l'assainissement est de type unitaire ou dans celles ayant un milieu récepteur extrêmement sensible. Ils peuvent compromettre les efforts réalisés dans la collecte et le traitement des eaux usées.

Cependant, malgré la prise de conscience, aussi bien des techniciens que des décideurs, de l'importance de ce problème, peu d'actions sont entreprises du fait notamment de la difficulté de quantification de ces phénomènes.

Aussi, avant de projeter des solutions techniques de traitement de ces eaux, il paraît nécessaire de déterminer avec une précision acceptable les débits et les flux polluants. Il semble opportun par ailleurs de tenter d'établir les relations de cause à effet entre pollution rejetée et désordres constatés.

L'une des voies possibles consiste à mesurer concomitamment et systématiquement les flux de pollution amenés par les différents rejets et les concentrations résultantes dans le milieu récepteur.

Cependant cette méthode soulève des difficultés pour des rejets permanents en nombre élevé. Elle devient vite impraticable en période de pluie, à cause du caractère temporaire et éminemment transitoire du phénomène à mesurer.

Une autre voie consiste à mettre au point des outils de modélisation mathématique permettant de quantifier les différents phénomènes mis en jeu. Ce type d'outils nécessite bien évidemment un certain nombre de mesures préalables afin de caler et valider les algorithmes retenus dans le modèle et de permettre son utilisation à d'autres sites.

C'est le cas du modèle FLUPOL, modèle qui décrit les rejets urbains par temps de pluie en liaison avec les caractéristiques de la pluie, des bassins de collecte et du réseau de collecte.

Après un bref rappel descriptif du modèle FLUPOL, son calage et sa validation réalisés à l'aide de mesures effectuées sur différents bassins versants français sont évoqués ci-après.

(*) Compagnie générale des eaux, détaché à l'agence financière de bassin Seine-Normandie.

(**) Agence financière de bassin Seine-Normandie.

FLUPOL : A model to forecast flow rates and flows of pollutants in water decontamination networks in time of rain Measuring and validation

The model FLUPOL describes urban pollution in times of rain linking up with the characteristics of rain, collecting basins and the collecting network. It enables simulation, upstream from an urban catchment area decontaminated by one or more networks, of the hydrograms and pollution flows engendered by any rain occurrence and characterized by a certain number of variables and takes into account a succession of phenomena from accumulation of waste deposits on the ground to a possible suspension of sediments in the channels. After a short description of the model, its measurement and validation are carried out with the help of different measurements carried out in various French catchment areas.

Liste des symboles

AR	ha	Surface du bassin versant homogène
C_{MAX}	kg/m^3	Concentration d'équilibre en cas de sédimentation
C_{MIN}	kg/m^3	Concentration d'équilibre en cas d'érosion
CHc	kg	Charge totale calculée
CHm	kg	Charge totale mesurée
Cmac	mg/l	Concentration maximum calculée
Cmam	mg/l	Concentration maximum mesurée
Cmc	mg/l	Concentration moyenne calculée sur l'événement
Cmm	mg/l	Concentration moyenne mesurée sur l'événement
Fmac	kg/s	Flux maximum calculé
Fmam	kg/s	Flux maximum mesuré
HPE	m	Hauteur totale de pluie dans la formule de Desbordes
HTP	mm	Hauteur totale de pluie dans les tableaux 1 à 6
I_{MAX5}	mm/h	Intensité maximum sur 5 minutes
IMPR	—	Coefficient de ruissellement
K_{DESB}	—	Coefficient multiplicateur de la formule de Desbordes
KP	—	Fraction en poids d'un polluant donné dans les matières en suspension provenant du sol
LNG	m	Longueur maximum d'un sous-bassin homogène
MD	kg/ha	Masse résiduelle à la fin de la pluie précédente
NJ	jour	Nombre de jours de temps sec
PNT	%	Pente moyenne du terrain
PS	$kg/ha \cdot j$	Masse de poussières et salissures se déposant au sol dans l'unité de temps et d'espace
Qmac	m^3/s	Débit maximum calculé
Qmam	m^3/s	Débit maximum mesuré
T3M	mn	Durée totale de la pluie dans les tableaux 1 à 6
T3	s	Durée totale de la pluie dans la formule de Desbordes
Vcal	m^3	Volume total calculé
Vmes	m^3	Volume total mesuré
Vmesr	m^3	Volume mesuré ruisselé
Vplu	m^3	Volume total précipité
Vts	m^3	Volume de temps sec
$\cap_1, \cap_2$	—	Fractions d'énergie totale consommée par l'écoulement

2. Le modèle FLUPOL

Le modèle FLUPOL permet de simuler, à l'aval d'un bassin versant urbain assaini par un réseau unitaire ou séparatif, les hydrogrammes et les flux de pollution engendrés par un événement pluvieux quelconque (1) (2) et caractérisés par un certain nombre de variables d'état.

Il tient compte d'une succession de phénomènes allant de l'accumulation des dépôts sur le sol à la remise en suspension éventuelle des sédiments dans les conduites.

Les principaux phénomènes simulés sont les suivants :

- calcul de l'évolution temporelle des dépôts entre deux pluies consécutives d'une part sur le sol en fonction des caractéristiques d'occupation du sol et, d'autre part, dans les conduites d'assainissement en fonction des caractéristiques de celles-là et du flot de temps sec éventuel ;
- calcul des apports en débit et flux de pollution de sous-bassins élémentaires à partir des caractéristiques d'une pluie donnée et de celles des sous-bassins (calcul suivant le modèle dit de réservoir linéaire pour les débits et d'un double réservoir linéaire pour les flux polluants) ;
- à chaque nœud du réseau, bilan des débits et des flux de pollution entrants et sortants en fonction des caractéristiques de chacun de ces nœuds (affluence, déversoir, dérivation, confluence, station de pompage, etc...) ;
- propagation dans chaque tronçon de conduite des débits et des flux de pollution en tenant compte du dépôt ou de la remise en suspension éventuel des sédiments.

Le modèle permet actuellement de simuler, outre le débit, l'évolution des quatre variables d'état suivantes : les matières en suspension, la DBO₅, la DCO et l'azote Kjeldahl.

Le lecteur trouvera dans l'article de G. BUJON (2) une explication détaillée de FLUPOL, notamment des différents phénomènes et des algorithmes qui s'y rattachent, en sachant par ailleurs que certaines améliorations sont intervenues depuis sa parution.

Ces améliorations portent, en particulier, sur un nouveau mode de simulation des phénomènes liés aux déversoirs d'orage et sur la possibilité de prendre en compte des stations de pompage.

3. Les bassins versants étudiés

Le calage et les validations du modèle FLUPOL sont réalisés à l'aide de mesures (3) (4) (5) (6) effectuées sur quatre bassins versants d'occupation de sols et de dimensions très différentes.

Ces bassins, situés dans la région Ile de France, sont les suivants :

- Bassin du collecteur des Coteaux (Paris) ;
- Bassin de Maurepas (département des Yvelines) ;
- Bassin des Ulis Nord (département de l'Essonne) ;
- Bassin du collecteur Fresnes-Choisy (départements des Hauts-de-Seine et du Val de Marne).

Chacun de ces bassins a fait l'objet de mesures hydrauliques, chimiques et biochimiques : en 1979 pour le collecteur des Coteaux, en 1980 et 1982 pour Maurepas, en 1982 pour les Ulis et en 1986 pour le collecteur Fresnes-Choisy.

Le Bassin du collecteur des Coteaux

Ce bassin versant est situé dans le 12^e arrondissement de Paris (75). Lors des mesures, la configuration du réseau de ce secteur avait été modifiée afin que le bassin versant étudié soit parfaitement délimité (suppression de tout mailage), la superficie résultante étant alors de 110 hectares. L'occupation du sol est de type résidentiel dense (250 habitants/hectare) et constituée essentiellement d'immeubles d'habitation à couverture classique en ardoises engendrant un coefficient de ruissellement très élevé (0,85).

Le réseau est de type unitaire et draine un flot de temps sec de l'ordre de 280 l/s.

La longueur totale de réseau prise en compte dans les simulations est de 1 600 mètres.

Un ensablement important est constaté lors des mesures. Son origine est attribuée à la faible pente des ouvrages de la partie aval (de l'ordre de 0,0005). Cet ensablement peut avoir des conséquences significatives sur les simulations.

Enfin, par temps de pluie, le réseau peut être délesté vers la Seine par l'intermédiaire d'un grand déversoir d'orage nommé « déversoir Proudhon » comportant plusieurs baies de déversement d'une longueur totale d'environ 18 mètres.

Le bassin de Maurepas

Ce bassin versant est situé dans le département des Yvelines (78) à l'Ouest de Paris et fait partie de la ville nouvelle de Saint-Quentin-en-Yvelines. Il couvre une superficie de 26,7 hectares et est composé d'un habitat résidentiel discontinu (100 habitants/hectare) formé pour 80 % d'une zone pavillonnaire à couverture classique et pour 20 % d'une zone de bâtiments collectifs à usage d'habitation dont la couverture est de type toiture-terrasse. La prédominance des bâtiments à couverture classique en tuiles a pour conséquence un coefficient de ruissellement assez élevé (0,70).

Situé en zone nouvelle, le réseau d'assainissement était, lors des mesures, strictement séparatif (seul un petit débit d'eau de drainage avait été détecté).

La longueur total de réseau prise en compte dans les simulations est de 800 mètres, les canalisations ayant un diamètre variant entre 800 mm et 1 160 mm.

Le bassin des Ulis Nord

Ce bassin versant est situé dans le département de l'Essonne (91) au Sud de Paris. Il couvre une superficie de 43,1 hectares et est composé d'un habitat collectif assez dense (350 habitants/hectare). La couverture des bâtiments est du type toiture-terrasse, type qui explique le coefficient de ruissellement assez faible (0,42).

Bien que situé en zone nouvelle, le réseau d'assainissement n'est pas strictement séparatif, le réseau pluvial transitant un flot de temps sec d'environ 3 l/s. Ce flot, bien que faible, engendre cependant des dépôts, notamment à l'extrémité du réseau à très faible pente.

La longueur totale de réseau prise en compte dans les simulations est de 2 750 mètres, les canalisations ayant un diamètre variant entre 600 mm et 1 800 mm.

Le bassin du collecteur Fresnes-Choisy

Le bassin du collecteur Fresnes-Choisy (2) (7) (8) est situé dans la banlieue Sud de Paris et concerne plusieurs départements. Cependant, pour des commodités de simulation, il est possible de limiter la zone aux seuls départements des Hauts-de-Seine et du Val-de-Marne, la zone ainsi couverte représentant près de 2 500 hectares. L'occupation du sol est très hétérogène : habitat pavillonnaire discontinu, habitat collectif dense, autoroutes urbaines, zones industrielles et zones d'activités tertiaires. Cependant, compte tenu de la densité moyenne d'habitants par hectare (100 habitants/hectare), on considère que l'ensemble du bassin est de type résidentiel discontinu.

Des études antérieures (7) (8) montrent que le coefficient de ruissellement de chacun des sous-bassins peut être déduit du coefficient d'imperméabilisation par une formule du type :

$$\text{Cruissellement} = a \cdot \text{Cimperméabilisation} + b$$

a et b étant deux coefficients calés à partir de mesures pluies-débits.

Le réseau de type pluvial comporte cependant un flot de temps sec de l'ordre de 75 l/s.

La longueur totale du réseau prise en compte est d'environ 23 km, le diamètre des ouvrages variant de 600 mm à 4 000 mm.

*
* *

En résumé, les caractéristiques principales des bassins sont les suivantes :

	Les Coteaux	Maurepas	Les Ulis Nord	Fresnes-Choisy
Surface ha	110,00	26,70	43,10	2 486
Nombre hab./ha	250	100	350	100
IMPR moyen	0,85	0,70	0,42	0,42
Type de réseau	unitaire	séparatif	séparatif	séparatif
Flot temps sec	oui	non	oui	oui

L'examen comparatif des 4 bassins versants étudiés montre que le modèle est confronté à des situations présentant :

— une occupation des sols très contrastée, le coefficient d'imperméabilisation moyen variant de 0,42 à 0,85 et le nombre d'habitants à l'hectare variant, quant à lui, de 100 à 350 ;

— des tailles de bassins allant de faible à très importante ;
— des réseaux aussi bien unitaires que séparatifs ayant ou non des débits de temps sec.

4. Le calage

L'objectif visé lors de l'établissement du présent modèle de simulation est la création d'un outil applicable au plus grand nombre de cas, sans qu'il soit nécessaire de retoucher à certains paramètres internes indépendants des caractéristiques spécifiques du cas étudié.

Aussi est-il nécessaire, avant d'utiliser un modèle au niveau opérationnel, de passer par un stade préalable de calage, stade permettant de régler certains paramètres en vue d'améliorer l'ajustement du modèle à des données expérimentales.

Ce réglage est une tâche qui mérite d'être effectuée sur le plus grand nombre de cas possibles ; elle est délicate, car il est difficile de trouver un jeu de paramètres satisfaisant à tous les cas considérés.

Dans le cas du modèle FLUPOL, le calage du modèle est réalisé à partir de deux jeux de données expérimentales provenant de certains des bassins versants précédemment cités, à savoir :

— pour le bassin de Maurepas, l'événement du 19 septembre 1980 ;
— pour le bassin des Ulis-Nord, l'événement du 21 mai 1982.

L'ajustement du paramètre KP est effectué à l'aide d'autres mesures que celles de ces deux campagnes pour des raisons explicitées ci-après.

Ce calage, dont les résultats figurent sur les *graphiques 1 et 2* (voir p. 130 et 131), a porté sur les paramètres PS, KP, K_{DESB} , $\cap_1$ et $\cap_2$.

4.1. La quantité spécifique de dépôts sur le sol PS en fonction de l'occupation du sol

Dans un premier temps, les simulations (2) sont réalisées à partir de valeurs provenant de la bibliographie américaine.

Il y a quatre types de zones : résidentiel dense, résidentiel discontinu, commercial et industriel. Les valeurs de PS sont fournies pour chacun d'eux en masse de dépôts par jour et par unité de longueur de trottoir.

Transposées en masse de dépôts par jour et par hectare, les valeurs initialement prises en compte sont les suivantes :

résidentiel dense	10 kg/j/ha
résidentiel discontinu	5 kg/j/ha
commercial	15 kg/j/ha
industriel	35 kg/j/ha

Compte tenu des données expérimentales disponibles, le calage ne porte que sur les deux premiers types de zone et conduit à adopter pour ceux-là les valeurs sensiblement différentes ci-après :

résidentiel dense	25 kg/j/ha
résidentiel discontinu	6 kg/j/ha

Pour les zones de type commercial ou industriel, les valeurs de la bibliographie américaine ont été conservées. Des campagnes de mesures spécifiques devront être menées pour affiner ces valeurs.

4.2. La fraction en poids KP d'un polluant donné dans les matières en suspension provenant du sol

Comme précédemment, les simulations initiales sont réalisées à partir de données bibliographiques prenant comme hypothèse que cette fraction est constante quel que soit l'événement simulé. La comparaison des résultats obtenus sur cette base avec les valeurs expérimentales utilisées pour le calage montre l'inexactitude de cette hypothèse et a conduit à retenir un coefficient KP variable en fonction des caractéristiques de la pluie.

La relation adoptée pour l'évaluation de ce coefficient KP fait intervenir l'intensité maximale de la pluie sur 5 min, I_{MAX5} , atteinte au cours de l'événement donnant lieu à simulation.

La relation reliant KP et I_{MAX5} est de la forme :

$$KP = a * (I_{MAX5} - c)^{-b} + d.$$

Cette relation permet de transcrire l'idée selon laquelle les pluies les plus intenses entraînent plus facilement des particules de forte densité à prédominance minérale et moins chargées en matières organiques carbonées ou azotées.

L'ajustement a été réalisé à partir des mesures du bassin de Maurepas pour lequel on disposait d'une année complète de mesures (pluie et charges totales en MES, DBO5 et DCO), charges non influencées par des remises en suspension éventuelles, ce bassin étant doté d'un réseau strictement séparatif.

Il aboutit aux formules suivantes :

$$\begin{aligned} \text{DBO5} &: KP = 0,28 * I_{MAX5}^{-0,572} \\ \text{DCO} &: KP = 1,47 * I_{MAX5}^{-0,419} \end{aligned}$$

Ces formules sont considérées comme applicables aux zones de type résidentiel au sens large.

Dans le cas des zones de types commercial et industriel, l'absence de mesure ne permet pas, pour l'instant, de déterminer des lois correspondantes.

L'absence de mesures des paramètres azotés sur le bassin de Maurepas empêche également la réalisation d'un ajustement similaire pour l'azote Kjeldahl.

Aussi, dans le cas du bassin du collecteur Fresnes-Choisy, on est amené à adopter une formulation légèrement différente (le bassin comportant des zones relativement variées) pour la DBO5 et la DCO et à réaliser un ajustement pour le NTK.

$$\begin{aligned} \text{DBO5} &: KP = 0,17 * (I_{MAX5} - 0,9)^{-0,700} + 0,05 \\ \text{DCO} &: KP = 0,93 * (I_{MAX5} - 0,5)^{-0,700} + 0,44 \\ \text{NTK} &: KP = 0,07 * (I_{MAX5} - 0,8)^{-0,600} + 0,001. \end{aligned}$$

Les ajustements concernant la DBO5 et la DCO sont peu différents de ceux déterminés pour les zones de type résidentiel. Ils permettent cependant de prendre globale-

ment en compte l'ensemble des zones existant sur le bassin du Fresnes-Choisy.

Les graphiques ci-dessous donnent les courbes d'ajustement pour les 3 variables d'état DBO5, DCO et NTK.

4.3. La valeur du coefficient multiplicateur de la formule de Desbordes

M. DESBORDES(1) propose dans sa thèse une formule comportant un coefficient K de proportionnalité entre le volume d'eau stocké à un instant donné sur une zone définie et le débit qui en sort au même instant.

Cette formule est la suivante :

$$K = K_{DESB} \cdot AR^{0,18} \cdot PNT^{-0,36} \cdot (1 + IMPR)^{-1,9} \cdot T_3^{0,21} \cdot LNG^{0,15} \cdot HPE^{-0,07}$$

Compte tenu des unités adoptées dans FLUPOL pour les différents termes de cette formule, le coefficient K_{DESB} correspondant a pour valeur 79,35.

D'une façon générale, cette valeur fournit de bons résultats mais minimise légèrement les débits de pointe. Aussi on a choisi d'adopter une valeur un peu plus faible égale à 50.

A titre d'illustration, dans le cas particulier de la pluie du 19 septembre 1980 à Maurepas, le graphique ci-dessous montre l'incidence de la modification de ce paramètre sur l'hydrogramme à l'exutoire du bassin.

4.4. Calage des coefficients $\cap_1$ et $\cap_2$ déterminant les conditions de dépôts ou remises en suspension

Rappelons brièvement que $\cap_1$ et $\cap_2$ sont des coefficients de proportionnalité qui lient la concentration de MES dans l'écoulement à :

- la vitesse de chute des particules sédimentables ;
- la vitesse d'écoulement de l'eau ;
- la perte de charge.

Cette notion de proportionnalité revient à considérer qu'une fraction constante de l'énergie sert soit à maintenir des particules sédimentables en suspension ($\cap_1$), soit à mettre en suspension et à les y maintenir des particules précédemment sédimentées ($\cap_2$).

Le calage effectué conduit à :

$$\cap_1 = 0,022 \quad \cap_2 = 0,018.$$

5. La validation

La validation du modèle consiste à comparer le modèle, préalablement calé à l'aide de données expérimentales particulières, à d'autres données expérimentales n'ayant pas servi au calage. Cette validation est réalisée sur les quatre bassins versants décrits précédemment.

Pour chacun d'eux, on dispose d'un certain nombre de mesures portant sur la pluviométrie, le débit et les flux polluants à l'aval du bassin versant.

Préalablement à chaque essai de validation, il est indispensable de connaître, à la fin de la pluie précédant la pluie à simuler, à la fois le degré de pollution du sol et la quantité de dépôts dans les différents tronçons du réseau. Il est donc nécessaire de procéder à une simulation continue de l'ensemble des pluies précédant celle à simuler et ceci à partir d'un événement antérieur suffisamment intense. Ainsi au début de l'événement choisi, on détermine :

- d'une part, le degré de salissure du sol des différents sous-bassins ;
- d'autre part, l'encrassement éventuel des différents tronçons du réseau.

Un grand nombre de simulations de validation, chacune correspondant à un bassin et une pluie donnés, a été réalisée pour les quatre bassins précités ; cinq d'entre elles sont choisies pour être présentées ici.

Il est bon de souligner que ces simulations sont réalisées avec un modèle identique quels que soient le bassin et la pluie étudiés.

Les événements simulés sont les suivants :

Bassin du collecteur Fresnes-Choisy

Pluie du 22 août 1986

Pluie du 15 septembre 1986

Pluie du 20 octobre 1986.

Bassin du collecteur des Coteaux

Pluie du 7 août 1979.

Bassin des Ullis-Nord

Pluie du 28 septembre 1982.

Les résultats figurent dans les graphiques 3 à 7 (p. 132 à 136) sur lesquels sont indiqués pour chaque événement :

- le ou les hyétogrammes utilisés (à l'exception de l'événement du bassin du collecteur des Coteaux pour lequel on reconstitue une pluie de projet à partir de données de postes pluviographiques proches du site de mesures) ;
- les hydrogrammes calculé et mesuré ;
- les courbes de variation des flux de MES, DBO5, DCO et NTK (le NTK ne figurant que pour le Fresnes-Choisy) calculées et mesurées.

Par ailleurs, les tableaux 1 à 6 (p. 137 à 139) donnent les principales caractéristiques résultant de chacune des simulations, soit :

Tableau 1 : Caractéristiques de la pluie et des dépôts sur le sol.

Tableau 2 : Résultats globaux concernant les volumes et les débits calculés et mesurés.

Tableaux 3 à 6 : Résultats globaux concernant les charges et les flux de pollution calculés et mesurés pour chacun des paramètres simulés.

Ces différents résultats font apparaître une concordance relativement bonne entre calculs et mesures quel que soit le paramètre. En particulier, la différence entre la charge totale calculée et celle mesurée est, dans la plupart des cas, inférieure à 20 %.

La concomitance entre pointe de flux et pointe de débit est la règle générale (comme le montre la pluie du 21 mai 1982 sur le bassin des Ulis-Nord). Si on raisonne en terme de flux, cela infirme la notion selon laquelle le premier flot d'orage (le first flush des anglo-saxons) serait le plus chargé en pollution. Les flux les plus importants étant ceux pouvant entraîner les conséquences les plus dommageables pour le milieu récepteur, ce ne sont pas obligatoirement les premiers flots d'orage qui sont les plus nocifs (cette notion de first flush est, par contre, vraie, dans la plupart des cas, en terme de concentration).

Enfin on constate que les algorithmes adoptés pour les phénomènes de dépôt-remise en suspension donnent des résultats satisfaisants sur les bassins sur lesquels des dépôts en réseau sont constatés (Collecteur des Coteaux et Les Ulis-Nord).

6. Conclusion

Les résultats présentés font apparaître le modèle FLUPOL sous un jour plutôt favorable, ces résultats étant obtenus sur des bassins versants de caractéristiques très dissimilaires.

Il n'est pas impossible, cependant, que la confrontation à des données expérimentales provenant d'autres bassins versants entraîne le changement ou l'ajout de certains algorithmes et prescrive certaines modifications du modèle actuel.

Quoi qu'il en soit, l'utilisation opérationnelle du modèle FLUPOL est actuellement en cours sur l'ensemble du réseau d'assainissement de l'agglomération parisienne. Une partie importante du réseau unitaire parisien est déjà schématisée et a donné lieu à des simulations sur les bases de certaines pluies historiques. Les premiers résultats donnent d'ores et déjà un ordre de grandeur des flux de pollution évacués vers la Seine par l'intermédiaire des principaux déversoirs d'orage parisiens.

Bibliographie

- [1] DESBORDES M. — *Réflexion sur les méthodes de calcul des réseaux urbains d'assainissement pluvial*. Université des sciences et techniques du Languedoc-Montpellier. Thèse de Docteur-Ingénieur, 224 p., février 1974.
- [2] BUJON G. — Préviation des débits et des flux polluants transités par les réseaux d'égouts par temps de pluie. Le modèle FLUPOL. *La Houille Blanche*, pp. 11-23, N° 1-1988.
- [3] HEMAIN J.C. — *Mesure de la pollution du ruissellement pluvial urbain. Suivi et bilan de la campagne expérimentale*. Ministère de l'Urbanisme et du Logement. Service technique de l'urbanisme, 74 p., juillet 1983.
- [4] HEMAIN J.C. — *Mesure de la pollution du ruissellement pluvial urbain. Exploitation des données*. Ministère de l'Urbanisme et du Logement. Service technique de l'urbanisme, 38 p. + annexes, août 1983.
- [5] RENARD D. et al. — *Mesures de débit-pollution dans le collecteur des Coteaux et le déversoir Proudhon*. LROP, 45 p. + annexes, décembre 1980.
- [6] GRANGE D. et al. — *Mesure de l'impact des eaux pluviales d'un grand bassin versant urbain sur la Seine : cas du bassin du collecteur Fresnes-Choisy*. AFBNS-LROP, 45 p. + annexes, juin 1987.
- [7] FAURE-SOULET A. et al. — *Etude de l'émissaire Fresnes-Choisy*. CETE d'Aix-en-provence - DDE du Val-de-Marne, 16 p. + annexes, janvier 1983.
- [8] HERREMANS L. et al. — *Simulation du fonctionnement des réseaux pluviaux : deux expériences de calage de modèles*. DDE du Val-de-Marne - CETE d'Aix-en-Provence — SAFEGE - 8 p., *XVII^e Journées de l'hydraulique de la SHF*, Nantes, septembre 1982.

Adresses des auteurs

Monsieur G. Bujon, Agence de bassin Seine-Normandie, 51, rue Salvador-Allende, 92027 Nanterre Cedex, Tél. : (1) 47 76 44 24.

Monsieur L. Herremans, Anjou-Recherche, 52, rue d'Anjou, 75008 Paris, Tél. : (1) 42 66 91 50.

Graphique 1

Bassin de Maurepas Pluie du 19 septembre 1980

Phase de validation

Graphique 2

Bassin des Ullis Nord

Pluie du 21 mai 1982

Phase de validation

Graphique 3

Bassin du collecteur Fresnes-Choisy Pluie du 22 août 1984

Phase de validation

Graphique 4

Bassin du collecteur Fresnes-Choisy

Pluie du 15 septembre 1986

Phase de validation

PLUVIOGRAPHE RUNCIS

PLUVIOGRAPHE DRLY

HYDROGRAPHE A L'EXUTOIRE

FLUX DE MES A L'EXUTOIRE

FLUX DE DBO5 A L'EXUTOIRE

FLUX DE DCO A L'EXUTOIRE

FLUX DE NTK A L'EXUTOIRE

Graphique 5

Bassin du collecteur Fresnes-Choisy

Pluie du 20 octobre 1986

Phase de validation

Graphique 6

Bassin du collecteur des Coteaux-Déversoir Proudhon Pluie du 7 août 1979

Phase de validation

Graphique 7

Bassin des Ullis-Nord Pluie du 28 septembre 1982

Phase de validation

TABLEAU 1 * : CARACTERISTIQUES DE LA PLUIE ET DES DEPOTS

	FRESNES-CHOISY			LES COTEAUX		MAUREPAS	LES ULIS	
DATE	22.08.86	15.09.86	20.10.86	07.08.79		19.09.80	21.05.82	28.09.82
				DEVERSE	AVAL DEV			
HTP	15,00	5,50	9,60	5,30		10,40	11,90	20,00
I _{max}	16,00	25,50	44,00	7,20		59,80	43,20	56,05
T3M	270	54	78	80		66	210	500
V _{plu}	372900	136730	238656	5830		2777	5129	8577
MD	0,00	40,00	65,00	25,00		40,00	180,00	145,00
NJ	60,00	1,90	0,15	6,10		8,00	2,40	1,90

TABLEAU 2 * : VOLUMES ET DEBITS

	FRESNES-CHOISY			LES COTEAUX		MAUREPAS	LES ULIS	
DATE	22.08.86	15.09.86	20.10.86	07.08.79		19.09.80	21.05.82	28.09.82
				DEVERSE	AVAL DEV			
V _{ts}	540	306	18000	0	2786	0	68	124
V _{mes}	232676	62951	139297	159	7300	1523	2328	3887
V _{mesr}	232136	62645	121297	159	4514	1523	2260	3763
V _{mesr} /V _{plu}	0,62	0,46	0,51	0,03	0,77	0,55	0,44	0,44
V _{cal}	237797	72557	139036	144	7348	1809	2124	3870
V _{cal} /V _{mes}	1,02	1,15	1,00	0,91	1,01	1,19	0,91	1,00
Q _{man}	19,450	10,650	24,500	0,110	1,390	1,380	0,773	0,480
Q _{mac}	19,470	10,850	21,670	0,110	1,370	1,389	0,522	0,453
Q _{mac} /Q _{man}	1,00	1,02	0,88	1,00	0,99	1,01	0,68	0,94

TABLEAU 3 * : MATIERES EN SUSPENSION (M.E.S.T)

	FRESNES-CHOISY			LES COTEAUX		MAUREPAS	LES ULIS	
DATE	22.08.86	15.09.86	20.10.86	07.08.79		19.09.80	21.05.82	28.09.82
				DEVERSE	AVAL DEV			
CHm	76432	47039	111235	86	3711	967	3151	3028
CHc	86942	45819	95817	50	3687	970	3874	3419
CHc/CHm	1,14	0,97	0,86	0,58	0,99	1,00	1,23	1,13
Fnam	11,680	11,060	26,430	0,052	1,031	1,131	1,097	1,306
Fnac	11,160	9,480	19,580	0,047	0,957	0,808	1,076	1,236
Fnac/Fnam	0,96	0,86	0,74	0,90	0,93	0,71	0,98	0,95
Cnam	656	1056	1090	780	799	856	2082	2900
Cnac	693	891	911	429	707	802	2211	2732
Cnac/Cnam	1,06	0,84	0,84	0,55	0,88	0,94	1,06	0,94
Cmm	328	747	799	541	508	635	1354	779
Cmc	366	631	689	347	502	536	1824	883
Cmc/Cmm	1,12	0,84	0,86	0,64	0,99	0,84	1,35	1,13

TABLEAU 4 * : DEMANDE BIOCHIMIQUE EN OXYGENE (DBO5)

	FRESNES-CHOISY			LES COTEAUX		MAUREPAS	LES ULIS	
DATE	22.08.86	15.09.86	20.10.86	07.08.79		19.09.80	21.05.82	28.09.82
				DEVERSE	AVAL DEV			
CHm	7235	4105	8608	11	601	32	142	160
CHc	8427	4261	8573	6	587	26	164	154
CHc/CHm	1,16	1,04	1,00	0,55	0,98	0,81	1,15	0,96
Fnam	1,100	0,870	2,280	0,007	0,129	0,038	0,033	0,036
Fnac	1,080	0,820	1,450	0,006	0,105	0,022	0,037	0,037
Fnac/Fnam	0,98	0,94	0,64	0,86	0,81	0,58	1,12	1,03
Cnam	62	33	94	98	145	35	158	81
Cnac	79	79	87	50	97	22	283	287
Cnac/Cnam	1,27	0,95	0,93	0,51	0,67	0,63	1,79	3,54
Cmm	31	65	62	69	82	21	61	41
Cmc	35	59	62	42	80	14	77	40
Cmc/Cmm	1,13	0,91	1,00	0,61	0,98	0,67	1,26	0,98

TABLEAU 5 * : DEMANDE CHIMIQUE EN OXYGENE (DCO)

	FRESNES-CHOISY			LES COTEAUX		MAUREPAS	LES ULIS	
DATE	22.08.86	15.09.86	20.10.86	07.02.79		19.09.80	21.05.82	28.09.82
				DEVERSE	AVAL DEV			
CHm	38424	24802	55312	72	4269	256	854	784
CHc	41565	23773	49251	35	2638	257	1256	1046
CHc/CHm	1,08	0,96	0,89	0,49	0,62	1,00	1,47	1,33
Fnam	6,360	5,290	13,940	0,036	0,753	0,288	0,232	0,247
Fmac	5,420	4,420	9,630	0,032	0,637	0,214	0,329	0,341
Fmac/Fnam	0,85	0,84	0,69	0,89	0,85	0,74	1,42	1,38
Cnam	357	505	575	559	910	219	636	547
Cmac	352	453	450	293	470	212	761	754
Cmac/Cnam	0,99	0,90	0,78	0,52	0,52	0,97	1,20	1,38
Cnn	165	394	397	453	585	168	367	202
Cnc	175	328	354	243	359	142	591	270
Cnc/Cnn	1,06	0,83	0,89	0,54	0,61	0,85	1,61	1,34

TABLEAU 6 * : AZOTE KJELDHAL (NTK)

	FRESNES-CHOISY		
DATE	22.08.86	15.09.86	20.10.86
CHm	1334	746	1259
CHc	1535	754	1624
CHc/CHm	1,15	1,01	1,29
Fnam	0,18	0,11	0,31
Fmac	0,172	0,129	0,284
Fmac/Fnam	0,95	1,17	0,91
Cnam	10,2	15,6	12,9
Cmac	17,1	13,0	13,1
Cmac/Cnam	1,68	0,83	1,02
Cnn	5,7	11,9	9,0
Cnc	6,5	10,4	11,7
Cnc/Cnn	1,14	0,87	1,30

NOTA : Le bassin du collecteur Fresnes-Choisy est le seul sur lequel des mesures de NTK ont été réalisées.

Fig. 41.

Fig. 42.

Fig. 43.

Fig. 44.

Fig. 45.

Fig. 46.