

APPROCHE MODELISATRICE DE LA MASSE DE POLLUTION TRANSPORTEE PAR LE RUISSELLEMENT PLUVIAL URBAIN

Eric SERVAT

I RESUME:

A partir des données recueillies dans le cadre de la campagne de mesure française, une approche modélisatrice de la masse de pollution transportée par le ruissellement pluvial urbain a pu être développée. Deux modèles de transport ont été élaborés pour simuler les charges totales transportées annuellement par le ruissellement et les charges transportées durant chaque événement pluvieux. Le niveau de précision atteint (+/- 5% à +/- 10% pour la charge annuelle et +/- 10% à +/- 30% pour les événements observés) apparaît satisfaisant bien qu'une telle modélisation puisse être améliorée.

II INTRODUCTION

L'approche modélisatrice développée ici concerne le transport en surface par le ruissellement pluvial urbain des polluants suivants: MES (Matières En Suspension), DBO5 (Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours), DCO (Demande Chimique en Oxygène). Cet objectif découle directement des buts fixés pour la campagne de mesure nationale (4 bassins versants suivis de 1980 à 1982, cf Tableau 1) à savoir: évaluer la masse de polluant transportée sur une longue durée (environ une année)

pour de petits bassins versants urbains (de taille inférieure ou égale à 50 ha). On présente ici une démarche conceptuelle compatible avec la représentativité du programme d'échantillonnage et s'appuyant sur les tendances révélées par l'analyse des données. (SERVAT, 1987).

BASSIN	MAUREPAS	LES ULIS	AIX ZUP	AIX NORD
Surface (ha)	26,7	43,1	25,6	92,0
Pente moyenne (%)	0,5	0,55	2,9	6,5
Imperméabilisation (%)	60	42	78	35
Terrain naturel	Limon - Argile à meulière (peu perméable)	Limon - Argile à meulière (peu perméable)	Marne sous éboulis (imperméable)	Eboulis. Marne formée calcaire en plaquettes (imperméable)
Habitat individuel (Surface totale)	70	0	0	30
Habitat collectif (Surface totale)	17	100	100	60
Type de toiture sur zone d'habitation collective	Terrasse	Terrasse	Terrasse	40% Terrasse 60% Pentes
Densité de Population (hab/ha)	100	350	210	40
Type de réseau	séparatif	séparatif	séparatif	séparatif
Collecteur au point de mesure	T 130-80	Ø1800	Ø1200	T 180-108
Pente au point de mesure (%)	0,5	0,1	1,7	2,0
Période de mesure	09/80 12/80 12/81 12/82	12/81 12/82	10/80 02/82	10/80 02/82

Tableau 1 - Caractéristiques des bassins versants retenus dans le cadre de la campagne de mesure (d'après HEMAIN, 1983)

III. EXPLOITATION STATISTIQUE DES DONNEES

Les distributions des variables mesurées dans le cadre de la campagne de mesure nationale sur la qualité du ruissellement ont été analysées d'un point de vue statistique (DESBORDES et SERVAT, 1984, SERVAT, 1987).

Plusieurs variables ont été identifiées comme étant principalement liées à la pollution du ruissellement pluvial urbain (DESBORDES et SERVAT, 1984, SERVAT, 1987). Il s'agit de:

- hauteur de pluie (HP, mm),
- intensité moyenne maximale en 5 mn (I_{max5} , mm/h),
- volume ruisselé (V_r , m^3),
- débit de pointe (Q_{max} , l/s),
- durée de temps sec (DTS, jours).

Il a été procédé à une analyse statistique complète (ajustement des distributions, étude de corrélation simple, analyse multivariable par la méthode dite du "Stepwise ascendant" (DRAPER et SMITH, 1981), analyse en composantes principales) qui a permis de tirer plusieurs conclusions:

- l'accumulation des polluants à la surface des bassins versants dépend des conditions climatiques pendant la période précédant l'événement considéré. La durée de temps sec joue un rôle indéniable mais elle ne suffit vraisemblablement pas à caractériser cette accumulation,
- le décollement et, par voie de conséquence, l'entraînement de la pollution sont fonction de l'agressivité de la pluie. Celle-ci est mesurée par une intensité sur une courte durée (5 mn dans le cas présent) ou par des variables qui lui sont liées, comme le débit de pointe.
- dans le cadre d'un travail de modélisation, les régressions multiples sont intéressantes à plus d'un titre. Sur le plan conceptuel, en effet, les équations "Stepwise" calculées sur les valeurs naturelles se heurtent à deux limitations (SERVAT, 1987):
 - la génération de valeurs négatives,
 - la présence d'une ordonnée à l'origine.

Pour un niveau d'adéquation pratiquement identique une formulation du type:

$$Y = c X_1^a X_2^b X_3^c \quad (1)$$

permet de surmonter ces difficultés. La combinaison qui semble s'imposer fait intervenir I_{max5} , V_r et DTS et s'écrit:

$$\text{Masse de polluant transportée} = K I_{max5}^a V_r^b DTS^c \quad (2)$$

Dans cette équation I_{max5} représente la capacité de la pluie à arracher la pollution de la surface du bassin versant et V_r l'élément moteur du

processus d'entraînement, alors que DTS caractérise la phase d'accumulation.

C'est l'ensemble de ces résultats et de ces conclusions qui a servi de base à l'approche modélisatrice exposée dans les paragraphes suivants.

IV. APPROCHE CONCEPTUELLE

Deux modèles de transport ont été élaborés et testés dans le cadre de cette étude. Pour l'un deux il était nécessaire d'évaluer la masse de pollution disponible en surface. Nous avons donc mis au point un modèle d'accumulation basé sur les hypothèses suivantes:

- un taux de production constant pour un pas de temps donné,
- un "stock" initial de pollution peu différent du "stock" final sur une longue durée ($R_o \approx R_n$),
- une masse entraînée au cours d'un événement i inférieure ou égale à la masse disponible, c'est à dire $E_i \leq M_{di}$

La première approche modélisatrice concernant le transport considère que la masse disponible évaluée à partir du modèle d'accumulation est un facteur limitant. La seconde approche considère un stock de pollution à deux niveaux à la surface du bassin versant: un premier niveau, fréquemment sollicité, et un second niveau, que nous appellerons niveau profond, parfois sollicité et qui ne constitue pas un facteur limitant. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire d'évaluer la masse disponible. Hormis cette masse disponible qui n'apparaît que dans le premier modèle, les variables retenues sont les mêmes dans les deux cas et résultent de l'analyse statistique des données. L'intensité maximale sur une courte durée, ici 5 minutes (I_{max5}) est représentative de "l'agressivité" de la pluie et de sa capacité à arracher la pollution accumulée en surface. Ces polluants mis potentiellement en mouvement doivent être acheminés vers l'exutoire du bassin versant. C'est le rôle du ruissellement de surface, d'où la prise en compte du volume ruisselé (V_r).

V. LE MODELE D'ACCUMULATION LINEAIRE

Un modèle d'accumulation linéaire a été élaboré à partir des hypothèses énoncées plus haut. La masse accumulée est calculée comme étant proportionnelle à la période de temps sec:

$$A_i = Pr \cdot DTS_i \quad (3)$$

avec:

A_i = masse accumulée (kg) à la surface du bassin versant durant la période temps sec DTS_i (en nombre de pas de temps) séparant les événements i et $i-1$.

Pr = production de polluant durant un pas de temps (kg/pas de temps).

L'écriture d'un bilan massique pour chacun des événements de la période d'observation et la prise en compte des différentes hypothèses formulées permet alors de calculer la production journalière pour chacun des bassins versants considérés (SERVAT, 1987). On aboutit, en effet, à l'équation suivante:

$$Pr = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{\sum_{i=1}^n DTS_i} \quad (4)$$

Le tableau 2 présente les valeurs de production journalière en MES, DBO5 et DCO auxquelles nous sommes arrivés.

	MES	DBO5	DCO
MAUREPAS	2.60	0.16	1.10
LES ULLIS	3.10	0.26	1.25
AIX-ZUP	1.70	0.22	1.22

Tableau 2 - Productions journalières calculées en MES, DBO5 et DCO (kg/jour/ha)

VI. LES MODELES DE TRANSPORT

Deux types de modèles de transport de la pollution ont été développés qui font appel à deux concepts différents: le premier nécessite une évaluation de la masse disponible (on utilisera pour cela le modèle d'accumulation linéaire) et le second considère un stock de pollution à deux niveaux qui ne constitue pas un facteur limitant. Dans le premier cas et dû aux résultats de l'analyse des données, les variables de contrôle sont:

- Md (kg), masse disponible,

- I_{max5} (mm/h), intensité maximale sur un pas de temps de 5 minutes,
- V_r (m³), volume ruisselé.

La méthode d'optimisation utilisée ici est celle développée par ROSEN-BROCK (1960). La fonction critère correspondante minimise la somme des carrés des écarts entre valeurs observées et valeurs calculées. On a procédé de la même façon dans chacun des cas, à savoir: une optimisation des paramètres réalisée sur une chronologie d'événements représentant environ 50% de la masse transportée sur la période d'observation, suivie du test, sur l'autre moitié de la série, de l'expression numérique ainsi déterminée.

Signalons, enfin, qu'il nous a paru très important de pouvoir retenir une même formulation (aux valeurs des paramètres près) pour les trois bassins versants étudiés (suite à certaines anomalies constatées dans l'évaluation des volumes écoulés, il n'a pas été possible de travailler en terme de masse sur le bassin d'Aix-Nord). C'est la condition sine qua non de l'éventuelle généralisation de tels modèles.

Dans le cas du premier type de modèle, l'équation retenue est alors:

$$E = K M d^\alpha I_{max5}^\beta V_r^\delta \quad (5)$$

avec: E = masse transportée durant un événement (kg),

K, α , β , δ paramètres du modèle propres à chaque bassin.

Dans le second cas deux variables de contrôle suffisent, I_{max5} et V_r . La formulation est alors la suivante:

$$E = K' I_{max5}^{\beta'} V_r^\delta \quad (6)$$

avec: E, I_{max5} et V_r définis plus haut,

K', β' , δ paramètres du modèle propres à chaque bassin.

Les résultats obtenus sont du même ordre pour les deux formulations: la précision sur les masses totales transportées est de l'ordre de 5%, et les événements les plus importants en terme de masse transportée sont re-produits à +/- 10% à +/- 30% près. C'est un résultat intéressant en soi dans la mesure où ils correspondent à la majeure partie de la pollution transportée.

Dans les deux cas, nous nous sommes livrés à une analyse de sensibilité du modèle. Nous avons testé chaque paramètre l'un après l'autre. La procédure retenue est la suivante: le paramètre étudié ayant une valeur

donnée on procède à une optimisation sur les autres. Si le paramètre étudié et fixé est peu ou pas sensible du tout, on obtiendra une bonne simulation quelle que soit sa valeur. Inversement si le paramètre étudié est sensible, hors d'une zone de variation bien définie et relativement peu étendue, nous ne pourrons simuler avec succès. Cette analyse de sensibilité a été réalisée pour les trois polluants et pour les bassins versants des Ullis et d'Aix-Zup. Elle a donné les résultats suivants:

$$\text{Formulation } E = K M d^{\alpha} I_{\text{max}} 5^{\beta} V_r^{\delta}$$

Les paramètres K et α ne sont pas sensibles. En ce qui concerne α c'est la valeur de Md, calculée à partir d'hypothèses simplificatrices, qui pourrait être mise en cause. β et δ sont par contre assez sensibles et l'on notera que les intervalles de variation délimités pour chacun des bassins présentent de larges zones de recouvrement (cf. Tableau 3).

	MES		DBO5		DCO	
	LES ULLIS	AIX ZUP	LES ULLIS	AIX ZUP	LES ULLIS	AIX ZUP
K	-	-	-	-	-	0.2-0.9
α	-	-	-	-	-	-
β	0.7-1.0	<1.2	0.06-0.3	0.6-1.5	0.2-0.6	0.3-0.8
δ	0.4-0.7	0.3-1.05	0.1-0.6	0.2-0.8	0.05-0.7	0.2-0.8

Tableau 3 - Intervalles de variation de paramètres, définis dans chacun des cas après étude de sensibilités. Modèle: $E = K M d^{\alpha} I_{\text{max}} 5^{\beta} V_r^{\delta}$

$$\text{Formulation } E = K' I_{\text{max}} 5^{\beta'} V_r^{\delta'}$$

L'étude de sensibilité a montré que les trois paramètres du modèle étaient assez sensibles. C'est un point positif plaçant en faveur de cette seconde formulation. Les intervalles de variation délimités pour chacun des bassins versants présentent, là aussi, de larges zones de recouvrement. L'ensemble de ces résultats a été reporté dans le Tableau 4.

	MES		DBO5		DCO	
	LES ULLIS	AIX ZUP	LES ULLIS	AIX ZUP	LES ULLIS	AIX ZUP
K'	1.5	>1	0.3-3	0.08-0.6	0.4-1.3	0.9-7
B'	0.8-1.2	<1	≥ 0.5	0.7-0.95	0.35-0.7	0.65-0.85
δ	0.2-0.7	-	0.25-0.65	0.5-0.65	0.4-0.8	0.4-0.6

Tableau 4 - Intervalles de variation de sparamètres, définis dans chacun des cas après étude de sensibilité. Modèle: $E = K' \text{Imax}5^{\beta'} \text{Vr}^{\delta'}$

Le premier modèle d'entraînement permet donc d'atteindre nos objectifs. Cependant, l'analyse de sensibilité montre que deux de ses quatre paramètres ne sont pas sensibles, laissant un doute quant au bien fondé de sa structure.

Au vu de ces résultats, il semble que pour un même niveau d'adéquation, on puisse retenir un modèle plus simple, basé sur le concept d'un stock à deux niveaux.

VII. CONCLUSIONS

A partir des données recueillies dans le cadre de la campagne nationale de mesure, notre objectif, en terme de modélisation, était de reproduire les charges en MES, DBO5, DCO transportées à la surface de différents bassins versants urbains d'une taille de l'ordre de 50 ha.

On a d'abord réalisé une première approche en deux étapes (accumulation et transport). Le modèle d'accumulation retenu est linéaire. Il suppose une production journalière constante et le fait que sur une longue durée la totalité de la masse de pollution produite soit entraînée. Le transport de la pollution a ensuite été simulé par un modèle à trois variables de contrôle: $E = K \text{Md}^{\alpha} \text{Imax}5^{\beta} \text{Vr}^{\delta}$.

Une seconde approche (ne comprenant qu'une étape) a ensuite été réalisée pour simuler l'entraînement de la pollution. Dans ce cas nous n'avons retenu que deux variables de contrôle. Ce modèle est conceptuellement différent dans la mesure où il suppose que la masse disponible n'est pas un facteur limitant. Sa formulation est: $E = K' \text{Imax}5^{\beta'} \text{Vr}^{\delta'}$.

Ce second modèle est plus satisfaisant en terme de sensibilité des paramètres et il permet d'obtenir des résultats ayant le même degré de précision.

A l'heure actuelle, l'amélioration des résultats passe certainement par l'obtention de mesures de qualité encore meilleure quel que soit le polluant considéré. Il s'agit donc, dans un premier temps, de s'efforcer de combler l'écart qui existe entre l'aspect "technologique" du problème (méthodologie, protocole de mesure, appareillage adapté, etc.) et l'aspect "exploitation de l'information recueillie", écart qui est à l'avantage très net de ce dernier pour le moment.

VIII. BIBLIOGRAPHIE

DESBORDES (M.), SERVAT (E.), 1984 - Solids in urban runoff. Statistical analysis of french experimental data. Third International Congress on Urban Storm Drainage, Göteborg, Sweden, 4-8 June.

DRAPER (N.R.), SMITH (H), 1981 - Applied Regression Analysis. John Wiley & Sons ed. 709 p.

HEMAIN (J.C.), 1983 - Mesure de la Pollution du Ruissellement Pluvial Urbain. Rapport 1: Suivi et Bilan de la Campagne Expérimentale. L.H.M. Université des Sciences. Montpellier. Note 21/83.

Rosenbrock (H. H.), 1960 - An Automatic Method for Finding the Greatest or Least Value of a Function. Computer Journal, 3, 175.

SERVAT (E.), 1987 - Contribution à l'Etude de la Pollution du Ruissellement Pluvial Urbain. Thèse de Doctorat. U.S.T.L. Montpellier