

## Approche modélisatrice de l'accumulation et du transport des M.E.S. à la surface des bassins versants urbains

M. DESBORDES

*Laboratoire d'Hydrologie Mathématique, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier*

J.C. DEUTSCH

*Service Technique de l'Urbanisme, Paris*

E. SERVAT

*ORSTOM, Montpellier*

### Resume :

On a analysé, au cours de cette étude, les données recueillies dans le cadre de la campagne de mesure française pendant plus d'une année.

Les objectifs à atteindre étaient d'une part, de reproduire la charge annuelle véhiculée par le ruissellement et d'autre part, de simuler les quantités de M.E.S. entraînées globalement au cours des événements pluvieux. Le niveau de précision atteint ( $\pm 5\%$  pour la charge annuelle et  $\pm 10\%$  à  $\pm 30\%$  pour les événements observés) apparaît comme satisfaisant bien qu'une telle modélisation puisse être améliorée.

### Abstract :

Available data collected within the context of the French national monitoring campaign over a period of one year have been analysed. The aims of the modelization were to produce total loads carried annually by runoff for each of the observed events. The accuracy level reached ( $\pm 5\%$  for the annual load and  $\pm 10\%$  to  $30\%$  for the observed events) appears satisfactory though such a modelization can always be improved.

### INTRODUCTION

L'impact des matières en suspension (M.E.S.) du ruissellement pluvial sur la qualité des eaux réceptrices ainsi que les problèmes qu'elles posent aux gestionnaires de réseaux ne sont en rien négligeables.

Les M.E.S. sont notamment responsables du colmatage des fonds et des berges, et leur présence en concentrations importantes entraîne une baisse de l'activité photosynthétique. En outre, elles peuvent aussi agir en tant que vecteur d'une autre forme de pollution puisqu'elles acheminent dans le milieu récepteur de nombreux polluants et toxiques

qui leur sont fixés par adsorption ou par liaison électro-statique.

Parallèlement, la présence de particules solides dans les réseaux d'assainissement entraîne une réduction de la section des conduites et, par voie de conséquence, une réduction parfois sensible de leur capacité hydraulique du fait de l'augmentation de la rugosité des parois et de la diminution des sections d'écoulement.

Les données utilisées dans le cadre de cette étude ont été recueillies pendant plus d'une année sur quatre bassins versants expérimentaux (Maurepas et les

Ulis dans la région parisienne, Aix-Zup et Aix-Nord à Aix-en-Provence) dans le cadre de la campagne de mesure nationale dont le Service Technique de l'Urbanisme était le principal instigateur (SERVAT, 1985), (Cf. tableau 1).

Bassin versant	MAUREPAS	LES ULIS	AIX-ZUP	AIX-NORD
Surface (ha)	26,7	43,1	25,6	92
Pente moyenne (‰)	0,5	0,55	2,9	6,5
Imperméabilisation (‰)	60	42	78	35
Habitat individuel (‰ de la surface totale)	70	0	0	30
Habitat collectif (‰ de la surface totale)	17	100	100	60
Densité de population (personnes/ha)	100	350	210	40
Types de réseaux	réseau séparatif		autocuré	
Concentrations en MES observées (mg/l) :				
Moyenne	185	512	288	471
Minimum - Maximum	21 - 894	40 - 2480	22 - 976	15 - 3780

Tableau 1  
Caractéristiques des bassins versants expérimentaux.

## DEFINITION DES OBJECTIFS

Dans le cadre de la campagne expérimentale française, les mesures étaient effectuées à l'exutoire des bassins versants. Il s'agissait de plusieurs échantillons prélevés durant les épisodes pluvieux. L'échantillonnage réalisé était donc le témoin d'un phénomène spatialement distribué et caractérisé par une concentration moyenne en M.E.S.

L'approche modélisatrice que nous avons développée dérive des objectifs de la campagne de mesure, à savoir : l'estimation des masses de polluants transportées sur une longue période (environ une année) pour de petits bassins versants urbains (surfaces < 50 ha), et l'évaluation des charges maximales pouvant être entraînées au cours d'un seul événement.

Dans un premier temps, on va estimer la production de matières en suspension à l'échelle du bassin considéré et pour un pas de temps journalier. On cherchera ensuite à reproduire la masse de particules transportée globalement au cours d'un événement.

La modélisation empirique du phénomène a montré ses limites (SERVAT, 1984). La détermination d'équations de régressions simples ou multiples (linéaires ou non) n'est d'ailleurs pas réellement satisfaisante dans la mesure où l'on n'a pas affaire à un phénomène reproductible mais à des événements. Dans ces conditions, les relations obtenues seraient fortement influencées par des événements importants à faible probabilité d'occurrence.

En fin de compte, la procédure que nous avons retenue est de nature conceptuelle et s'appuie sur les tendances révélées par l'analyse des données (SERVAT, 1984).

## APPROCHE CONCEPTUELLE

Le schéma retenu est celui décrit par DESBORDES et al (1980) et représenté en figure 1.

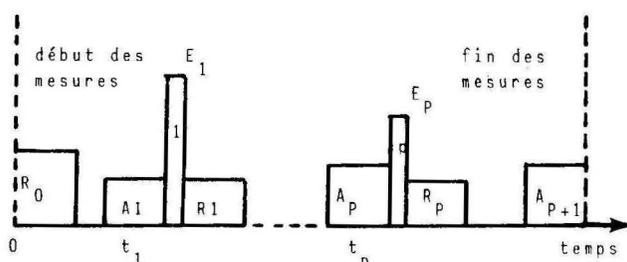


Figure 1  
Schéma conceptuel de l'accumulation et du transport des M.E.S. avec :

$A_i$  = masse accumulée à la surface du B.V. au cours de la période de temps sec séparant les événements pluvieux  $i$  et  $i-1$ .

$E_i$  = masse entraînée par le ruissellement de surface au cours de l'événement  $i$ .

$R_i$  = masse résiduelle à la surface du bassin versant après l'événement  $i$ .

$M_{di}$  = masse disp. à l'entraînement au cours de l'événement  $i$   $M_{di} = A_i + R_{i-1}$

L'établissement des modèles d'accumulation et de transport est basé sur plusieurs hypothèses.

En ce qui concerne l'accumulation, on a supposé que la production journalière de

RAPPORT II.8

M.E.S. était constante à l'échelle d'un bassin versant et que la conservation de la masse était vérifiée, c'est-à-dire, que sur une longue période (une année environ) le "stock" initial de M.E.S. ( $R_0$ ) est peu différent du "stock" final ( $R_n$ ) présent à la surface du bassin. Dans ce cas, la masse de particules produite et la masse de particules entraînée sont égales, en moyenne, sur la même période. Le système restera cependant indéterminé puisqu'il ne nous est pas possible de mesurer  $R_0$  et  $R_n$ . On peut réduire le champ de cette indétermination en introduisant des contraintes numériques ou physiques.

Les résultats de l'analyse des données ont contribué à l'élaboration du modèle de transport. On a supposé que la masse de M.E.S. véhiculée par le ruissellement est fonction de trois variables :

\* La masse disponible. La relation entre la masse disponible et la masse transportée est généralement admise. La composante "antécédents climatiques" peut ainsi être prise en compte par l'intermédiaire de la durée de temps sec (DIS) qui intervient dans le cadre du modèle d'accumulation.

\* L'intensité moyenne maximum sur un intervalle de temps de courte durée, cinq minutes dans le cas présent ( $I_{max}$  5). Cette variable est caractéristique de l'agressivité de la pluie et de la capacité à décoller et entraîner la pollution accumulée en surface.

\* Le volume ruisselé, VR, qui transporte les particules jusqu'à l'exutoire du bassin versant.

La masse transportée étant le seul élément du schéma conceptuel retenu qui puisse actuellement être mesuré, c'est ce que le modèle élaboré devra s'attacher à représenter.

ACCUMULATION DES M.E.S. A LA SURFACE DES BASSINS VERSANTS

Le modèle d'accumulation retenu est un modèle linéaire basé sur les hypothèses définies précédemment.

La masse accumulée est directement proportionnelle à la durée de temps sec

$$A_i = Pr \times DTS_i \quad (\text{éq. 1})$$

avec :

$A_i$  : masse accumulée à la surface d'un bassin versant durant la période de temps sec  $DTS_i$  (en nombre de

pas de temps) qui sépare les événements  $i$  et  $i-1$ .

$Pr$  : production de M.E.S. pendant un pas de temps.

On peut établir un bilan massique pour chacun des épisodes de la période d'observation :

$$\begin{array}{r} R_0 + A_1 = E_1 + R_1 \\ R_1 + A_2 = E_2 + R_2 \\ \vdots \\ R_{k-1} + A_k = E_k + R_k \\ \vdots \\ R_{n-1} + A_n = E_n + R_n \end{array}$$

et en sommant :

$$R_0 + \sum_{i=1}^n A_i = \sum_{i=1}^n E_i + R_n \quad (\text{éq. 2})$$

Avant supposé que  $R_0$  était peu différent de  $R_n$ , on peut calculer la valeur de la production journalière de M.E.S. :

$$\sum_{i=1}^n A_i = Pr \times \sum_{i=1}^n DTS_i \quad (\text{éq. 3})$$

L'équation 2 peut alors s'écrire :

$$R_0 + Pr \times \sum_{i=1}^n DTS_i = \sum_{i=1}^n E_i + R_n \quad (\text{éq. 4})$$

et

$$Pr = \frac{\sum_{i=1}^n E_i + (R_n - R_0)}{\sum_{i=1}^n DTS_i} \quad (\text{éq. 5})$$

Si, après une longue période d'observation, l'hypothèse  $R_0 \approx R_n$  est vérifiée, alors :

$$Pr = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{\sum_{i=1}^n DTS_i} \quad (\text{éq. 6})$$

On a ainsi déterminé les valeurs de production journalière :

Aix-Zup	:	1,7 kg/ha/j
Maurepas	:	2,6 kg/ha/j
Les Ulis	:	3,1 kg/ha/j

Ce modèle d'accumulation linéaire vérifiant les hypothèses initiales, nous l'avons retenu de préférence à d'autres (SERVAT, 1984), (accumulation asymptotique, accumulation selon une fonction puissance, accumulation parabolique avec un stock présentant une limite supérieure) qui ne pouvaient satisfaire les critères d'adéquation retenus et qui présentaient des fonctions critères trop élevées, une indépendance des valeurs de  $R_0$  et  $R_n$ , une incohérence au niveau de l'échelle des temps entre le modèle et le phénomène qu'il doit représenter, etc.

Ayant la possibilité de calculer les masses disponibles, nous sommes maintenant en mesure de modéliser le transport des particules accumulées en période de temps sec.

#### TRANSPORT DES M.E.S. ACCUMULEES

L'objectif, en terme de transport des M.E.S., était de reproduire la masse entraînée globalement au cours de la série observée ainsi que la masse transportée au cours de chaque événement.

Les variables retenues dans ce but sont au nombre de trois :

- masse disponible,  $M_d$  (Kg)
- intensité maximum moyenne sur un pas de temps de 5 minutes,  $I_{max}$  5 (mm/h)
- volume ruisselé,  $VR$  (m<sup>3</sup>)

La formulation du modèle est la suivante :

$$E = K M_d^\alpha I_{max} 5^\beta VR^\gamma \quad (\text{éq. 7})$$

dans laquelle :

$E$  = masse transportée durant un événement (Kg).

$M_d$ ,  $I_{max}$  5,  $VR$  définis ci-dessus.  $K$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  paramètres propres à chaque bassin versant.

L'optimisation des paramètres a été réalisée au moyen de la méthode de ROSEN-BROCK (1960).

La fonction critère utilisée minimise la somme des carrés des écarts entre les valeurs observées et calculées :

$$F = \frac{\sum (E_{obs} - E_{calc})^2}{N \times 1000} \quad (\text{éq. 8})$$

Pour chaque bassin versant, quatre cents itérations nous ont conduit aux valeurs de  $K$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  reportées dans le tableau 2 :

	AIX-ZUP	LES ULIS	MAUREPAS
$K$	0.697	0.996	0.412
$\alpha$	0.324	0.161	0.165
$\beta$	0.536	0.818	0.921
$\gamma$	0.307	0.421	0.382

Tableau 2  
Valeurs des paramètres pour chaque bassin versant.

Les différents paramètres ont des valeurs comparables d'un site de mesure à l'autre, ce qui est intéressant dans la mesure où l'un des objectifs est d'arriver à une loi d'entraînement qui puisse être généralisée au moins dans sa forme.

Les résultats, en terme d'écarts et de fonction critère, ont été regroupés au sein du tableau 3 :

	AIX-ZUP	LES ULIS	MAUREPAS
Fonction critère	50.981	92.757	20.408
Ecart entre masses totales observées et calculées (%)	- 5,8 %	+ 5,3 %	+ 13,0 % (+ 2,5 % sans l'événement du 16.5.1982)
Ecart par rapport aux données de calage (%)	- 6,1 %	1,4 %	12,0 %
Ecart par rapport aux données restantes (%)	- 5,6 %	9,8 %	- 33,6 % (- 12 % sans l'événement du 16.5.1982)

(L'événement du 16.05.82 est assez exceptionnel. Il a transporté près de six tonnes de M.E.S.)

Tableau 3  
Résultats obtenus avec l'expression :  $E = K M_d^\alpha I_{max} 5^\beta VR^\gamma$

Les écarts "observés-calculés" sont suffisamment réduits pour permettre de reproduire les masses de particules globalement transportées avec une assez bonne précision. C'est ce que montre le tableau 4 :

RAPPORT II.8

	Masse totale observée (Kg)	Masse totale calculée (Kg)
AIX-ZUP	20 650	19 448
LES ULIS	36 196	38 125
MAUREPAS	22 060 (16 087 sans l'événement du 16.05.82)	19 089 (16 483 sans l'événement du 16.05.82)

Tableau 4  
Comparaison masse totale observée - masse totale calculée

Dans le cas des événements transportant de faibles masses, les écarts "observés-calculés" restent généralement élevés, ce qui peut être dû à la difficulté qu'il y a dans ce cas, à privilégier telle ou telle variable explicative.

En ce qui concerne les événements ayant véhiculé des masses de particules importantes, l'écart "observé-calculé" est généralement compris entre +/- 10 % et +/- 30 %. C'est assez bon dans la mesure où cela concerne la majeure partie des M.E.S. rejetées dans le milieu récepteur.

Une autre méthodologie de mesure et la prise en compte de variables climatiques supplémentaires (vitesse du vent, humidité, etc.) devraient permettre d'améliorer ces résultats.

Les données enregistrées dans le cadre de cette campagne de mesure ne nous ont pas permis de déterminer des intensités maximales moyennes pour un pas de temps inférieur à cinq minutes. D'autres types de pluviographes auraient pu mettre en évidence des intensités plus élevées sur des pas de temps plus courts (30 secondes ou 1 minute) permettant peut-être de mieux caractériser l'agressivité de la pluie. Or, en zone urbaine, il semble que ce paramètre soit un facteur explicatif important de l'entraînement des M.E.S., puisqu'une fois décollées de la surface du sol, les particules sont presque automatiquement entraînées par le ruissellement.

### CONCLUSION

Afin de reproduire les charges de MES une approche en deux temps, accumulation et transport, nous a paru la plus représentative. Nous avons retenu un modèle d'accumulation linéaire s'appuyant sur une production journalière constante de M.E.S. et sur l'hypothèse que la totalité de la masse produite était entraînée sur une longue durée.

Le transport des M.E.S. a été simulé à l'aide d'un modèle à trois variables : masse disponible, intensité moyenne maximale sur un pas de temps de cinq minutes et volume ruisselé. Les résultats sont assez bons dans la mesure où la masse globale transportée sur une longue durée peut être reproduite avec une précision de l'ordre de +/- 5 % par une expression du type :

$$E = K M d^{\alpha} I_{\max} 5^{\beta} V R^{\gamma}$$

La reproduction des masses observées au cours des petits événements n'est pas de la même qualité. Dans ce cas, en effet, l'influence relative des différentes variables pluviométriques ou débitométriques n'est pas bien connue. En ce qui concerne les événements plus importants, le niveau de précision atteint (de l'ordre de +/- 10 % à +/- 30 %) semble satisfaisant compte tenu des données dont nous disposons et des objectifs définis précédemment.

Cette modélisation des phénomènes de transport et d'accumulation réalisée dans le cadre de bassins versants offrant des données nombreuses reste indubitablement perfectible. Sa généralisation se heurte actuellement à la définition de la durée de la campagne de mesure nécessaire au calage des paramètres du modèle.

De même, d'autres objectifs pourraient être assignés à cette modélisation. Ils conduiraient à appréhender les phénomènes différemment puisqu'ils reposent sur des pas de temps généralement plus faibles : reconstitution de pollutogrammes, gestion en temps réel, maîtrise des rejets dans le milieu récepteur, etc.

### REFERENCES

- DESBORDES M., DEUTSCH J.C., HEMAIN J.C. (1980) "Urban runoff pollution in France: a national program". Proc. Helsinki Symposium, June 1980. IAHS. Publ. 130. pp. 29-36.
- ROSENBROCK (1960) "An automatic method for finding the greatest or least value of a function". Computer Journal. Vol. 3. p. 175.
- SERVAT E. (1984) "Contribution à l'étude des matières en suspension du ruissellement pluvial à l'échelle d'un petit bassin versant urbain". Thèse Doct-Ing. U.S.T.L. Montpellier. France.
- SERVAT E. (1985) "Mesure de la pollution du ruissellement pluvial urbain. Campagne expérimentale française. Rapport de synthèse". L.H.M. - U.S.T.L. Montpellier. Note 1/1985.