

ACADEMIE DE MONTPELLIER

UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC

T H E S E

présentée à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc

pour obtenir le diplôme de DOCTORAT

Spécialité : Génie Civil, Aménagement (Hydrologie)

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA POLLUTION
DU RUISSELLEMENT PLUVIAL URBAIN

par

Eric SERVAT

Soutenue le 30 Septembre 1987 devant le Jury composé de :

MM.	C.	BOCQUILLON, Président
	M.	ALQUIER
	M.	DESBORDES
	J.C.	DEUTSCH
	F.	MONIOD

ACADEMIE DE MONTPELLIER

UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC

THESE

présentée à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc

pour obtenir le diplôme de DOCTORAT

Spécialité : Génie Civil, Aménagement (Hydrologie)

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA POLLUTION DU RUISSELLEMENT PLUVIAL URBAIN

par

Eric SERVAT

Soutenue le 30 Septembre 1987 devant le Jury composé de :

MM.	C.	BOCQUILLON, Président
	M.	ALQUIER
	M.	DESBORDES
	J.C.	DEUTSCH
	F.	MONIOD

ORSTOM Fonds Documentaire

N° : 25.054 ex 2

Cote : A

29 JUIN 1988

TDM 43

ORSTOM

Editions de l'ORSTOM

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE
POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

Collection :

Travaux et documents microédités

PARIS 1988

ISBN 2-7099-0919-7

© ORSTOM

« La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, « que les «copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective» et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, «toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite» (alinéa 1er de l'article 40).

« Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code Pénal ».

F4

ANNEE : 1987

NOM DE L'AUTEUR : SERVAT Eric

UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC (MONTPELLIER II)

TITRE : CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA POLLUTION DU RUISSELLEMENT PLUVIAL URBAIN

RESUME :

La première partie de ce travail présente les aspects généraux de la pollution du ruissellement pluvial urbain. Elle est l'occasion de faire le point sur un certain nombre de modèles de qualité des eaux drainées par les réseaux d'assainissement.

On dresse ensuite un rapide bilan de ce que fût la campagne de mesure française, assez exceptionnelle tant par sa durée que par son côté systématique. C'est dans ce cadre là qu'ont été recueillies les données que nous avons utilisées à l'occasion de cette thèse.

L'analyse statistique réalisée sur ces données à l'aide de différentes techniques (Stepwise, A.C.P.,...) permet de tirer certaines conclusions concernant les paramètres qui ont une influence sur l'accumulation et l'entraînement de la pollution (MES, DBO5, DCO) à la surface des bassins versants.

Partant de là on procède ensuite à une modélisation de l'entraînement de la pollution. Notre objectif était de reproduire les masses entraînées observées sur une longue durée mais aussi à l'échelle d'un événement pluvieux. Dans ce but nous présentons ici deux modèles reposant sur des concepts différents.

MOTS-CLES :

MES, DBO5, DCO, Ruissellement urbain, Pollution, Hydrologie urbaine, Accumulation, Entraînement, Modélisation.

à Anne,

à Julien et Camille.....

"LA REPONSE EST OUI,
MAIS QUELLE PEUT BIEN ÊTRE LA QUESTION ?"

Woody ALLEN

REMERCIEMENTS

Avant toute autre chose, je tiens à exprimer ici tous mes remerciements et toute mon amitié à Monsieur M. DESBORDES, Maître de Conférences au Laboratoire d'Hydrologie Mathématique de Montpellier, qui m'a fait bénéficier de ses larges connaissances et de sa grande expérience dans le domaine de l'Hydrologie urbaine. Sa disponibilité, ses nombreux conseils, ses encouragements, son aide efficace et sa patience m'ont été précieux pour mener à bien ces travaux de recherche.

Mes remerciements vont maintenant aux autres membres du Jury qui ont également contribué, à plus d'un titre, à la réalisation de ce travail :

Monsieur le Professeur C. BOCQUILLON, Directeur du Laboratoire d'Hydrologie Mathématique, a toujours suivi mes travaux avec attention et bienveillance. Je lui suis reconnaissant d'avoir bien voulu présider le Jury de cette thèse.

Monsieur le Professeur M. ALQUIER, de l'Institut de Mécanique des Fluides de l'ENSEEIH de Toulouse m'a fait part de ses conseils avisés en plusieurs occasions et a accepté d'être l'un de mes rapporteurs.

Monsieur J.C. DEUTSCH, Chargé de mission auprès du Directeur du Service Technique de l'Urbanisme, a permis la réalisation de ce travail notamment sur le plan matériel. Sur le plan scientifique et technique sa collaboration me fût précieuse.

Monsieur F. MONIOD, Directeur de recherche à l'ORSTOM, a accepté d'apporter sa caution à ce travail en étant le second de mes rapporteurs.

Je tiens également à remercier Messieurs F. BRISSAUD et J.M. MASSON, Maîtres de Conférences au Laboratoire d'Hydrologie Mathématique, et A. GUILBOT, Ingénieur CNRS, pour la formation qu'ils m'ont apportée en statistiques et en hydrologie.

J'exprime de même toute ma sympathie à tous les membres du L.H.M. avec qui j'ai eu le plaisir de travailler et qui, à titres divers, ont tous contribué à la réalisation de cette thèse.

Je terminerai en adressant mon amitié à mes collègues du Laboratoire d'hydrologie de l'ORSTOM à Montpellier, et plus particulièrement à Mesdames : J. RAZANAMIADANA et J. CANER qui ont bien voulu assurer la présentation matérielle de ce travail, ainsi que Monsieur J.F. BOYER pour son aide efficace en ce qui concerne la réalisation des graphiques.

SOMMAIRE

	Page
AVANT PROPOS	6
INTRODUCTION	8
ASPECTS GENERAUX DE LA POLLUTION DU RUISSELLEMENT PLUVIAL	11
LA CAMPAGNE DE MESURE FRANCAISE ET SES PRINCIPAUX RESULTATS	28
EXPLOITATION STATISTIQUE DES DONNEES : MES, DBO5, DCO	38
APPROCHE MODELISATRICE	86
CONCLUSION	115
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	120
ANNEXES	137

AVANT PROPOS

Je tiens à exprimer ici toute ma reconnaissance à plusieurs organismes publics sans lesquels ce travail n'aurait pu être réalisé :

- le Service Technique de l'Urbanisme (Direction de l'Urbanisme et des Paysages),

- le Service des Etudes Générales du Service Assainissement de la Direction Départementale de l'Équipement de la SEINE ST-DENIS,

- le Centre d'Études Techniques de l'Équipement d'AIX-EN-PROVENCE.

INTRODUCTION

INTRODUCTION

La prise de conscience de l'existence réelle d'une pollution véhiculée par le ruissellement pluvial est assez récente puisque les premières études importantes datent de la fin des années 1960 et du début des années 1970 (APWA (1969), AVCO (1970), SARTOR et BOYD (1972)) malgré quelques tentatives préalables plus isolées (WEIBEL et al. (1964)).

En FRANCE, c'est en 1978 que le Service Technique de l'Urbanisme (Ministère de l'Urbanisme et du Logement) a pris en charge la création d'un groupe de travail comprenant des représentants des divers services des Ministères concernés (à l'époque : Environnement et Cadre de Vie, Intérieur, Santé Publique), des collectivités locales, des Universités et de bureaux d'études privés.

Il est très vite apparu que les données disponibles, essentiellement d'origine américaine, n'étaient guère utilisables (schémas d'urbanisation différents, méthodologies de recueil des données plus ou moins appropriées, etc.), et qu'il fallait envisager de lancer en FRANCE une campagne de mesure nationale.

Quatre bassins versants expérimentaux ont finalement été retenus, AIX-ZUP et AIX-Nord à AIX-EN-PROVENCE, LES ULIS et MAUREPAS dans la région parisienne, et la campagne a pu être lancée. Elle nous a fourni l'ensemble des données utilisées dans le cadre de nos travaux de recherche. La finalité de ceux-ci était directement liée aux objectifs de la campagne de mesure, à savoir :

- estimer les charges polluantes maximales pouvant être entraînées au cours d'un événement pluvieux,
- évaluer les quantités de pollution rejetées dans le milieu récepteur au cours d'une année.

C'est dire que pour chacun des paramètres majeurs de pollution (MES, DBO5, DCO) nous avons cherché à établir un modèle permettant de reproduire, en premier lieu, les masses entraînées et

rejetées au cours d'une longue période (une année environ) et, en second lieu, les masses véhiculées globalement à l'échelle d'un événement pluvieux.

Le chapitre 1 de cette thèse présente les aspects généraux de la pollution du ruissellement pluvial urbain et fait un rapide bilan des travaux de modélisation effectués par ailleurs dans ce domaine.

La campagne de mesure française et ses principaux résultats font l'objet du chapitre 2.

Le chapitre 3 consiste en une exploitation statistique des données (MES, DBO5, DCO) passant en particulier par l'utilisation de la méthode dite du "Stepwise" et de la technique d'analyse en composantes principales.

L'approche modélisatrice (accumulation et entraînement des polluants) est développée dans le chapitre 4.

On trouvera, en outre, en annexe, les publications et les communications réalisées à partir de ces travaux.

CHAPITRE 1

ASPECTS GENERAUX DE LA POLLUTION DU RUISSELLEMENT PLUVIAL

1. GENERALITES

La pollution du ruissellement pluvial urbain est un phénomène dont l'importance n'a cessé de croître avec l'essor de l'urbanisation. De nombreuses raisons expliquent aisément le fait que l'entraînement, au cours des événements pluvieux, de la pollution accumulée à la surface des bassins versants soit devenu une préoccupation (ELLIS (1985), FERRARA (1985), HVITVED-JACOBSEN (1985)) :

- i) Comme les matières en suspension (MES) des ruissellements naturels sur terrains découverts (naturels ou agricoles) celles du ruissellement pluvial urbain sont responsables du colmatage des fonds et des berges. Leur présence en concentrations importantes fait que les MES sont généralement impliquées dans les problèmes d'accroissement de la turbidité, d'ensablement des fonds et de modification de la faune piscicole (YOUNG (1970), PITT et BAZEMAN (1980), RYLAND et al. (1980)). Les matières en suspension du ruissellement pluvial urbain sont également un vecteur pour d'autres formes de pollution adsorbées ou fixées électrostatiquement. De nombreux polluants, tels que les nutriments, les pesticides, les métaux lourds, se fixent sur les MES par réaction chimique ou par effet de surface, sont véhiculés par ce biais, et sont finalement libérés dans le milieu naturel (BRUNNER (1977), POPE et al. (1978), TOMLINSON et al. (1980), REVITT et al. (1981), BUFILL (1984), MARSALEK (1985), WALLER et HART (1985)), occasionnant ainsi des dommages importants sur la faune et sur la flore par accumulation (notamment dans les chaînes alimentaires). (THOMANN (1978), NEELY (1980), RAY et TRIEFF (1980), BELTON et al. (1982), KAY (1984), FERRARA (1985)).

Les gestionnaires de réseaux sont quant à eux confrontés à d'importants problèmes de colmatage des canalisations dus aux matières en suspension. Le dépôt de ces MES conduit également à une réduction parfois sensible de la capacité hydraulique des réseaux du fait de

l'augmentation de la rugosité des parois et de la diminution des sections d'écoulement due à l'accumulation de particules dans certaines parties des conduites.

ii) Les eaux de ruissellement pluvial en zone urbaine véhiculent de nombreux polluants autres que les MES :

- matières oxydables qui réduisent la teneur en oxygène dissous des eaux réceptrices. Cette pollution est évaluée en quantité d'oxygène demandée (DBO5, demande biochimique en oxygène mesurée en 5 jours, et DCO, demande chimique en oxygène). (CASPER (1978), KEEFER et al. (1980), HARREMOES (1982), HVITVED-JACOBSEN (1982), HVITVED-JACOBSEN (1985), VILLENEUVE et LAVALLEE (1985))
- composés azotés et phosphatés en quantités cependant inférieures à celles rencontrées dans les eaux usées domestiques. (KLUESENER et LEE (1974), HVITVED-JACOBSEN et al. (1984))
- bactéries et virus pathogènes. Ce type de pollution est généralement limité dans le cas du ruissellement pluvial (BENZIE et COURCHAINÉ (1966), GELDREICH et al. (1968), MANCINI (1980), BENNERSTEDT et BRATTBERG (1984), SCHILLINGER et GANNON (1985)).

Ces polluants sont eux aussi à l'origine de perturbations et de modifications de la faune et de la flore du milieu récepteur.

iii) Du fait de la prédominance de concepts hygiénistes en matière d'assainissement, la conception classique du drainage des eaux a été basée sur leur évacuation rapide vers des points de rejets ou de traitements (stations d'épuration). Cela a conduit à la mise en place d'ouvrages de collecte et de traitement convenant mal aux polluants entraînés par le ruissellement pluvial en zone urbaine. En outre, le fonctionnement de ces ouvrages manque de souplesse et ne peut être adapté simplement à cette forme de pollution.

iv) Les impacts sur les milieux récepteurs aux conséquences parfois graves sont la résultante de la conception des modes de drainage et de rejet en vigueur (déversoirs d'orage des systèmes unitaires et rejets directs des réseaux pluviaux).

Caractérisation précise et traitement efficace de ce type de pollution sont délicats dans la mesure où l'on se heurte à trois difficultés majeures :

- i) la pollution des eaux pluviales est discontinue et se déverse dans le milieu naturel en un laps de temps très court avec des conséquences parfois dommageables
- ii) les volumes à traiter par les méthodes classiques après concentration au niveau des stations d'épuration sont importants et répartis sur des durées très faibles.
- iii) les sources de pollution des eaux de ruissellement pluvial sont diffuses et inégalement réparties dans l'espace.

2. ORIGINE DES POLLUANTS

Les types de polluants et les valeurs des charges véhiculées par le ruissellement pluvial urbain sont fonction de plusieurs facteurs (SERVAT (1984), DESBORDES (1985), ELLIS (1985)) :

- importance de la pollution atmosphérique,
- type d'occupation des sols,
- nature et état des surfaces perméables et imperméables,
- nature et intensité du trafic routier,
- pratiques locales en matière de nettoyage urbain,
- et, bien sûr, caractéristiques spécifiques des événements pluvieux.

2.1. Origine atmosphérique

Les poussières contenues dans l'atmosphère, et résultant essentiellement de l'activité urbaine, peuvent se déposer par temps sec comme par temps de pluie. On considère cependant que les dépôts par temps de pluie représentent de 60 à 70 % de la contribution totale de l'atmosphère (MELANEN (1981), OBERST (1982)).

Pour certains auteurs (GOETTLE (1978), RANDALL et al. (1978), MELANEN (1981)) la contribution de l'atmosphère peut représenter jusqu'à 50 ou 70 % de la pollution du ruissellement pluvial urbain. On s'accorde cependant à considérer que cette proportion ne dépasse pas 15 % (NOVOTNY et CHESTERS (1981), PITT et BAZEMAN (1982)). La majeure partie des polluants atmosphériques semble entraînée durant les premières minutes de la pluie (GOETTLE (1978), RANDALL et al. (1978), RANDALL et al. (1981)), occasionnant un phénomène de "premier lavage" comparable au "first flush" ou "première chasse" des réseaux d'assainissement, citée dans certains cas comme responsable des concentrations élevées parfois enregistrées en début de ruissellement (rappelons que le "first flush" est un phénomène qui consiste en une remise en suspension des dépôts des épisodes précédents dans les conduites des réseaux d'assainissement). La pollution qui en résulterait à la surface du sol serait dès lors relativement indépendante de l'abondance ou de l'intensité de la pluie.

2.2. Toitures

Plusieurs études permettent d'affirmer que les toitures contribuent à fournir de l'ordre de 15 à 30 % des MES du ruissellement pluvial urbain (HEDLEY et KING (1971), ELLIS (1977)). Certains, tel MALMQUIST (1983), estiment également que 70 à 90 % du cuivre et 50 à 70 % du zinc contenus dans le ruissellement pluvial proviennent de la corrosion des matériaux de toiture.

En outre, du fait de la grande rapidité des réponses des toitures pentues, il est possible que le ruissellement qu'elles engendrent soit à l'origine du phénomène de "first flush" parfois observé

dans les réseaux lors des averses (PRATT et al. (1984)). Dans ces conditions le rejet des eaux de toitures dans des dispositifs de stockage ou d'infiltration contribuerait à la réduction de la pollution comme à celle des débits de pointe (SCHILLING (1982)).

2.3. Surfaces de voiries

Les études les plus anciennes, et en particulier celle de SARTOR et BOYD (1972) à laquelle il est très souvent fait référence, concluent que la pollution résultant des activités urbaines s'accumule sur les surfaces imperméables, et en particulier les voiries, d'où elle est ensuite évacuée par le ruissellement. A l'heure actuelle les modes d'accumulation n'ont pas été définitivement identifiés. Si certains estiment que l'accumulation peut se poursuivre indéfiniment si elle n'est pas interrompue par les précipitations ou les nettoyages, d'autres pensent qu'une limite est atteinte au bout de quelques jours et qu'elle est contrôlée par l'intensité du trafic urbain (WHIPPLE et al. (1977), HAMILTON et al. (1985)). Le tableau 1 (ELLIS (1985)) présente des ordres de grandeur de la pollution accumulée sur les voiries. Les valeurs élevées de pollution bactérienne dans les quartiers résidentiels peuvent être attribuées à la présence d'animaux domestiques.

L'analyse granulométrique des particules accumulées sur les voiries montre que 70 à 85 % d'entre elles ont des diamètres compris entre 2 et 2000 microns (ELLIS (1979)). Bien que seulement 4 à 8 % présentent un diamètre inférieur à 60 microns, ces particules représentent 25 % de la demande en oxygène, 50 à 60 % des graisses et caoutchoucs, 30 % des métaux lourds, 30 à 50 % de l'azote et du phosphore et 10 à 15 % des coliformes totaux. Les particules de moins de 250 microns de diamètre (soit 35 à 40 % de la masse totale des particules) représentent donc plus de 75 % du pouvoir polluant des voiries (DESBORDES (1985)).

On notera à ce propos que certains, tels SARTOR et BOYD (1972) ou SHAHEEN (1975), ont montré que les techniques classiques de nettoyage des rues étaient particulièrement inefficaces pour les particules inférieures à 250 microns

	Zones résidentielles		Zones commerciales	Zones industrielles	Grandes voies de circulation
	Habitat individuel	Habitat collectif			
Accumulation de matières solides (en kg/km de bordure de trottoir)	10-182	30-210	13-180	80-288	13-1100
DBO5 (conc. en ppm)	5260	3370	7190	2920	2300-10000
DCO (conc. en ppm)	39300-40000	40000-42000	39000-61730	25100	53650-80000
Ntot (conc. en ppm)	460-480	550-610	410-420	430	225-1600
Pb (conc. en ppm)	1570	1980	2330	1590	450-2346
Cd (conc. en ppm)	3.2	2,7	2,9	3,6	2.1-10.2
Coliformes fécaux (MPN/g)	60570-82500	25621-31800	36900	30700	18768-38000

Tableau 1 : Pollution accumulée sur les voies urbaines(d'après ELLIS (1985)).

3. LES MODELES DE QUALITE DES EAUX DRAINEES PAR LES RESEAUX D'ASSAINISSEMENT

Notre propos n'est pas de dresser ici une liste exhaustive des différents modèles conceptuels ou empiriques mais de présenter certaines approches modélisatrices. Pour plus de détails, nous renverrons le lecteur à d'autres publications (SERVAT (1984), DESBORDES (1985), HEMAIN (1985), HUBER (1985)).

3.1. Les modèles conceptuels

3.1.1. Généralités

Les modèles peuvent être utilisés pour atteindre certains des objectifs de l'étude de la qualité du ruissellement urbain. Ils permettront, notamment, de :

- caractériser la pollution du ruissellement pluvial,
- fournir des entrées pour les études de qualité des milieux récepteurs,
- déterminer les dimensions et les effets de dispositifs de traitement ou de contrôle,
- autoriser des analyses fréquentielles des paramètres de qualité,
- fournir des éléments d'entrées pour les études d'optimisation des coûts.

En règle générale, on peut dire qu'à l'heure actuelle aucun modèle ne saurait fournir de valeurs précises de charges et de concentrations sans un calage à partir de données locales. C'est une différence majeure par rapport à certains modèles de ruissellement dont l'utilisation peut être généralisée (DESBORDES (1985)).

Les premières tentatives de modélisation ont été faites dans le cadre du développement du Storm Water Management Model (SWMM) entre 1969 et 1971 sous l'égide de l'U.S. EPA. (METCALF and EDDY, Inc. et al. (1971,a), HUBER et al. (1981), ROESNER et al. (1981)).

Actuellement, la quasi-totalité des modèles réellement opérationnels (c'est-à-dire, présentant un "manuel de l'utilisateur" et une documentation détaillée, étant utilisé par d'autres personnes que les inventeurs, et étant continuellement adapté, en particulier par un service national) a été élaborée aux USA mis à part le QQS (RFA) (GEIGER et DORSCH (1980,a), (1980,b)) et le NIVA (NORVEGE) (LINDHOLM (1978)).

3.1.2. Accumulation des polluants à la surface des bassins versants

Les modélisations proposées pour l'accumulation ne détaillent pas les divers processus mis en jeu comme les précipitations atmosphériques sèches, la contribution de la végétation, l'érosion des surfaces, etc., mais aussi l'érosion par le vent, le nettoyage des rues, etc.

AMMON (1979) a montré que les formulations conceptuelles généralement utilisées correspondaient à l'une des formes suivantes :

- accumulation linéaire

$$P = at \quad \text{avec} \quad P = \text{masse de polluant accumulée} \quad (1.1)$$

t = temps écoulé depuis la dernière averse

a = coefficient

- accumulation variable mais non limitée

$$P = atb \quad \text{avec} \quad b < 1 \quad (1.2)$$

- accumulation limitée

$$P = PL(1 - e^{-bt}) \quad (1.3)$$

$$\text{ou } P = PL \left(\frac{t}{a+t} \right) \quad \text{avec} \quad PL = \text{limite d'accumulation} \quad (1.4)$$

3.1.3. Lessivage des surfaces par la pluie.

La plupart des formulations est d'origine empirique et s'appuie sur les travaux de SARTOR et BOYD (1972) confirmés par les résultats de NAKAMURA (1984,a) (1984,b) qui conduisent à un concept de décroissance de l'érosion avec la diminution du stock disponible à l'entraînement. Soit sous une forme générale (DESBORDES, 1985) :

$$dP/dt = -Kw f(i) . P . AV(i) \quad (1.5)$$

avec Kw = coefficient d'ajustement
 i = intensité de la pluie nette
 P = masse de polluant sur la surface au temps t
 $AV(i)$ = un facteur de disponibilité

En supposant $f(i) = AV(i) = 1$, ce qui correspond à un processus du premier ordre, on arrive à la forme classique de l'équation de lessivage (METCALF et EDDY, Inc. et al. (1971,a) :

$$P_0 - P = P_0(1 - e^{-Kwt}) \quad (1.6)$$

P_0 étant la quantité initiale de polluant sur le bassin.

Posant $f(i) = i$, l'expression devient :

$$P_0 - P = P_0(1 - e^{-Kwit}) \quad (1.7)$$

Ce qui conduit à l'expression de la concentration C :

$$C = |dP/dt|/Q = Kw P/A \quad (1.8)$$

avec A : surface du bassin. et Q : débit

indiquant que C décroît continuellement avec P .

En réalité de nombreuses observations montrent une augmentation des concentrations lorsque l'intensité de la pluie nette croît au cours d'un événement (METCALF et EDDY, inc. et al. (1971,b)).

Il a donc paru nécessaire d'introduire un facteur de disponibilité $AV(i)$ de la forme :

$$AV(i) = a + b i^c \quad (1.9)$$

a, b, c = paramètres dépendant du type de polluant.

Ces facteurs de disponibilité sont utilisés dans la version originale et la version II du SWMM (METCALF et EDDY, Inc. et al. (1971,a), HUBER et al. (1975)), dans le modèle STORM (ROESNER et al. (1974)), et dans les modèles DR3M-QUAL (ALLEY et SMITH (1982)) et FHWA (DEVER et al. (1983)). Si $c > 0$ les concentrations pourront croître avec l'intensité en cours d'averse.

La dernière version du SWMM propose une équation simplifiée :

$$dP/dt = Kw i^c P \quad (1.10)$$

correspondant à un facteur de disponibilité dans lequel $a = 0$ et $b = 1$ (HUBER et al. (1981)).

On notera, en outre, que la forme exponentielle classique de l'équation de lessivage a fait l'objet de nombreuses publications (PRICE et MANCE (1978), AMMON (1979), SONNEN (1980), HOGLAND et al. (1984), SHUBINSKI et al. (1984), SUEISHI et al. (1984)).

D'autres formes ont également été proposées, principalement fondées sur les théories du transport solide (CRAWFORD et DONIGIAN (1973), DONIGIAN et DAVIS (1978), JOHANSON et al. (1980)).

3.1.4. Erosion des surfaces

Bon nombre des différents types de surfaces rencontrés dans les bassins versants urbains sont susceptibles d'être érodés par la pluie (HUBER (1985)).

Les expressions retenues pour représenter le phénomène d'érosion sont généralement issues de modèles simplifiés développés pour des bassins versants naturels (CRAWFORD et DONIGIAN (1973), SOLOMON et GUPTA (1977), DONIGIAN et DAVIS (1978)).

On ramène habituellement l'érosion à un phénomène à deux composantes :

a) l'attaque par la pluie, souvent représentée par :

$$S_r = k_1 i b_1 \quad (1.11)$$

avec S_r = masse de sédiment arrachée par la pluie d'intensité i

b_1 = exposant voisin de 2 (SOLOMON et GUPTA (1977), DONIGIAN et DAVIS (1978)).

k_1 = coefficient relié empiriquement à de nombreux facteurs : "érodibilité", occupation des sols, végétation, etc ... (WISCHMEIER et SMITH (1958) (1965), HEANEY et al. (1975), HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER (1977), JOHANSON et al. (1980), HUBER et al (1981)).

b) l'entraînement par le ruissellement, traduit par une formulation semblable :

$$F_s = k_2 Q b_2 \quad (1.12)$$

avec F_s = flux massique de sédiments transporté par le ruissellement Q

b_2 = exposant compris entre 1.6 et 2 (SOLOMON et GUPTA (1977), DONIGIAN et DAVIS (1978)).

3.1.5. Transport et dépôt des sédiments dans les réseaux

Le dépôt des sédiments dans les réseaux est une composante importante de la pollution du ruissellement pluvial urbain dans la mesure où il peut être à l'origine des phénomènes de "first flush" parfois constatés (PISANO et QUEIROZ (1977), PISANO et al. (1979), BROEKER (1984), GEIGER (1984), LINDHOLM (1984), STOTZ et KRAUTH (1984)).

Des approches théoriques comme celle de SONNEN (1977) sont basées sur la mécanique du transport solide (GRAF (1971)). Cependant, seul le modèle SWMM comporte un logiciel de calcul qui procède d'une simplification des travaux de SONNEN.

3.1.6. Transport dans les réseaux des polluants autres que MES

Les différents modèles utilisés s'appuient sur l'équation d'advection et de diffusion dont la formulation est :

$$\frac{\delta c}{\delta t} + U \frac{\delta c}{\delta x} = D \frac{\delta^2 c}{\delta x^2} \pm S \quad (1.13)$$

avec c = concentration d'un polluant donné

t = temps

x = distance le long de la conduite

U = vitesse moyenne

D = coefficient de dispersion longitudinale

S = terme représentant les entrées et sorties du système

Cette équation n'est que rarement utilisée sous sa forme complète.

L'annulation du second membre correspond à un "écoulement piston" (advection pure), schéma fréquemment appliqué dans les modèles (FISCHER et al. (1979), CUNGE et al. (1980), ALLEY et SMITH (1982)).

La suppression des termes d'advection et de diffusion permet d'obtenir un schéma de "mélangeur parfait" notamment employé dans le SWMM (HUBER et al. (1981)).

3.2. Les modèles empiriques

3.2.1. Généralités

La complexité des processus intervenant dans la pollution véhiculée en un point d'un bassin versant urbain limite beaucoup les approches mécanistes ou conceptuelles de la modélisation (DESBORDES, 1985).

Les modélisations conceptuelles disponibles ne sauraient être mises en oeuvre concrètement sans un calage préalable de leurs nombreux paramètres. L'expérimentation reste donc, et pour longtemps encore, une nécessité fondamentale à toute étude de la pollution du ruissellement pluvial (DESBORDES, 1985). Il est donc réaliste d'envisager des approches purement empiriques s'appuyant sur les méthodes statistiques de traitement de l'information.

Il convient cependant de noter que l'approche modélisatrice, qu'elle soit empirique ou conceptuelle, présente des limites importantes dans la mesure où les résultats d'études particulières ne peuvent être généralisés sans risque. A fortiori, lorsque de nombreuses formulations empiriques des phénomènes conduisent à des résultats contradictoires quant aux influences de diverses variables prétendument explicatives du phénomène (DESBORDES (1985)) (WHIPPLE et al. (1977), MELANEN et LAUKANEN (1980), HEMAIN (1981), JEWELL et ADRIAN (1982)).

3.2.2. Divers types de modèles empiriques

On distingue habituellement trois principaux types de modèles (DESBORDES (1985), HEMAIN (1985)).

- les modèles de planification utilisés pour tester divers scénarios d'aménagement et leurs impacts sur les milieux récepteurs. Ils concernent l'estimation de charges mensuelles ou

annuelles généralement obtenues par corrélation avec des paramètres classiques de pluie ou de ruissellement (FIELD et al. (1977)).

- les modèles de projet ou de contrôle utilisés pour estimer les charges polluantes au cours d'un événement pluvieux. Ce sont généralement des équations de régressions multiples, linéaires ou non, donnant une charge polluante Y_i d'un polluant donné en fonction de variables X_j caractéristiques de la pluie et/ou du ruissellement (SERVAT (1985,a)).
- les modèles de pollutogramme qui représentent l'évolution des concentrations au cours d'un événement pluvieux et qui sont développés à des fins de recherche ou pour tester l'efficacité de dispositifs de contrôle de la pollution. Ils comprennent des équations de régression faisant apparaître des variables dépendant du temps t , voire le temps lui-même (DONIGIAN et CRAWFORD (1976)) comme par exemple :

$$C_i(t) = a Q^b(t) \quad (1.14)$$

ou
$$C_i(t) = a' Q^{b'}(t) t^c \quad (1.15)$$

avec $C_i(t)$ = concentration d'un polluant i à l'instant t

$Q(t)$ = débit ruisselé à l'instant t .

3.2.3. Principaux résultats

Bien qu'il y ait eu de très nombreuses études de caractérisation de la pollution du ruissellement pluvial réalisées au cours des dix dernières années, les résultats sont peu exploitables car pratiquement impossibles à généraliser. Le tableau 2 montre l'étendue des domaines de variation de la DCO pour 29 études américaines (U.S. EPA (1983)).

Les mêmes incertitudes se retrouvent dans la mise en évidence des variables explicatives des phénomènes (HEMAIN (1981), JEWELL et ADRIAN (1982), DESBORDES et SERVAT (1984)). La hiérarchisation des variables peut, en effet, se montrer très différente d'une étude à l'autre.

SITE	Superficie (ha)	Densité de popul. (Nb de pers./acre)	Imp. %	Nb. Obs.	Concentration moyenne en DCO par événement (mg/l)			
					Moyenne	C.V.	Médiane	Intervalle de confiance à 90%
CO1-Big Dry Cr	13.2	19	41	16	129	.72	105	79-139
CO1-Cherry	22.8	24	38	14	122	.66	102	77-136
CO1-116/Claude	66.8	14	24	15	137	.74	103	76-139
DC1-La Keridge	27.2	21	33	44	60	.66	50	43-58
DC1-Stratton	3.2	-	-	31	51	.45	45	39-53
IL1-John N	21.6	18	19	31	126	.80	98	79-122
KS1-Overton	23.2	8	38	14	162	.67	135	101-180
MD1-Bolton Hill	5.6	30	51	19	218	1.38	128	85-193
MD1-Homeland	9.2	9	29	13	172	.73	139	101-192
MD1-Mt Wash.	6.8	12	29	20	168	.85	128	96-170
MD1-Res Hill	4.0	55	76	13	177	.85	135	94-194
WA1-Surrey	38.0	9	29	118	48	.54	42	39-46
WI1-Burbank	25.2	15	50	27	39	.79	30	24-38
WI1-Hastings	13.2	17	51	23	41	.55	36	30-44
FLI-Young Apts	3.6	-	6	12	73	.96	52	34-79
TX1-Hart	151.2	9	40	11	82	.83	63	42-94
WI1-Lincoln	14.4	18	57	16	91	.95	66	46-94
TN1-R2	35.6	4	13	11	45	.39	42	34-52
DC1-Westleigh	16.4	3	21	39	51	.46	46	41-52
KS1-IC-92-nd	25.2	-	37	11	176	.98	126	80-197
IL1-John S.	15.6	18	18	29	111	.80	87	69-108
TN1-R1	27.6	11	33	11	120	.96	87	56-135
WA1-Lake Hills	40.8	12	37	127	44	.54	38	36-41
IL1-Mattis S.	11.2	22	37	30	180	.72	146	119-178
FL1-Charter Hdg	16.8	-	16	12	55	.64	47	35-64
DC1-Fairidge	7.6	-	34	48	51	.46	47	42-52
IL2-Comb Inlets	209.6	8	17	24	138	.90	102	78-134
NC1-1023	129.6	6	27	34	90	.97	64	51-82
DC1-Stedwick	10.8	15	34	45	45	.60	39	34-45

Tableau 2 : Variations de la DCO sur les bassins du programme américain (d'après U.S. EPA (1983))

De même les diverses modélisations proposées peuvent conclure à des effets opposés d'une variable-donnée (HEMAIN (1981), JEWELL et ADRIAN (1982)).

Aucun modèle ne semble donc, à l'heure actuelle, plus performant qu'un autre. Il est donc indispensable, dans un premier temps, de réaliser un programme spécifique d'acquisition de données puis de construire un modèle empirique particulier ou de caler un modèle existant (DESBORDES (1985)).

CHAPITRE 2

LA CAMPAGNE DE MESURE FRANCAISE ET SES PRINCIPAUX RESULTATS *

1. HISTORIQUE

Comme nous l'avons dit précédemment, c'est en 1978 que le Service Technique de l'Urbanisme a créé le groupe de travail n° 8 "Pollution des Eaux de Ruissellement. Choix d'un système d'assainissement".

Etant donné le nombre et la spécificité des objectifs visés dans ce cadre, il a fallu créer trois sous-groupes :

- sous-groupe 1 : typologie des bassins versants et pathologie des réseaux d'assainissement,
- sous-groupe 2 : technique de la mesure, interprétation de la donnée,
- sous-groupe 3 : traitement de la pollution du ruissellement pluvial.

Les sous-groupes 1 et 2 ont fonctionné en parallèle, le premier recherchant des bassins versants sur lesquels des mesures représentatives du phénomène pourraient être réalisées, le second élaborant une méthodologie et une technique de mesure.

La campagne de mesure s'est déroulée de septembre 1980 à décembre 1982 sur quatre bassins versants (deux en région parisienne, LES ULIS et MAUREPAS, gérés par le Laboratoire Régional de l'Ouest Parisien (LROP), et deux à AIX-EN-PROVENCE, AIX-ZUP et AIX-Nord, gérés par le Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement (CETE)), dont on trouvera les principales caractéristiques dans le tableau 3.

* Cette campagne de mesure a donné lieu à la rédaction d'un document de synthèse (SERVAT (1985,a)) s'appuyant sur les travaux d'HEMAIN ((1983,a), (1983,b), (1983,c), (1984)).

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 plaquette (imperméable)
Habitat individuel (Surface totale)	70	0	0	30
Habitat collectif (Surface totale)	17	100	100	60
Type de toiture sur zone d'habit. collec.	Terrasses	Terrasses	Terrasses	40% Terrasses 60% Pentes
Densité de Popul. (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 3 : Caractéristiques des bassins versants retenus dans le cadre de la campagne de mesure (d'après HEMAIN (1983,a)).

2. BILAN QUANTITATIF ET QUALITATIF

On trouvera dans le tableau 4 la liste des indicateurs de pollution étudiés. MES, DBO5 et DCO sont les trois indicateurs de base, choisis en vue d'établir des comparaisons avec les données disponibles d'eaux usées ou de rivières. Pour ces trois paramètres on a procédé à des analyses sur des échantillons moyens mais également sur des échantillons fractionnés afin d'obtenir des pollutogrammes.

L'ensemble des données recherchées a été obtenu pour plus de 70 % de l'ensemble des événements pluvieux ayant donné lieu à un ruissellement.

Les caractéristiques des événements pour lesquels on dispose de pollutogrammes (de 10 à 20 selon les bassins) sont très variées ce qui leur confère une bonne représentativité.

Ces résultats se révèlent satisfaisants et sont le fruit d'une méthodologie d'échantillonnage bien adaptée et d'un suivi très strict assuré par les unités opérationnelles.

En outre, un examen des données (SERVAT (1985,a)) a montré que les échantillons recueillis offraient toute garantie quant à leur représentativité. Une série de vérifications a, en effet, permis de conclure que l'asservissement des préleveurs au débit était tout à fait correct (HEMAIN (1983,a)), et que les coefficients de variation de la distribution des volumes moyens prélevés étaient suffisamment faibles (0,09 à 0,18) pour que ces derniers puissent être considérés comme constants. Nous reviendrons plus loin sur le problème de la représentativité du point de prélèvement proprement dit dans la section d'écoulement étudiée.

INDICATEUR	CODE	METHODE D'ANALYSE	UNITE	SEUIL DE DETECTION
DCO	1	Norme AFNOR NFT 90101	mg/l d'O ₂	4,0
MES	2	Norme AFNOR NFT 90105	mg/l	2,0
DBO5	3	Norme AFNOR NFT 90103 (*)	mg/l d'O ₂	2,0
MES % ORGANIQUE	11	Norme AFNOR NFT 90105	%	
MES % MINERAL	12	Norme AFNOR NFT 90105	%	
DCO Ad2	21	Norme AFNOR NFT 90101	mg/l d'O ₂	4,0
DBO5 Ad2	22	Norme AFNOR NFT 90103 (*)	mg/l d'O ₂	2,0
PLOMB	31	Absorption Atomique sans flamme (***)	mg/l	0,0015
MERCURE	32	Générateur de vapeur et A.A. sans flam.	mg/l	0,0001
ZINC	33	Absorption Atomique avec flamme	mg/l	0,01
CADMIUM	34	Absorption Atomique sans flamme	mg/l	0,0002
NICKEL	35	Absorption Atomique sans flamme	mg/l	0,001
CHROME	36	Absorption Atomique sans flamme	mg/l	0,0005
CUIVRE (**)	37	Absorption Atomique sans flamme	mg/l	0,001
AZOTE KJELDAHL	41	Minéralisation et distillation et dosage colorimétrique du NH ₄	mg/l de N	0,05
AZOTE AMMONIACAL	42	dosage colorimétrique du NH ₄ Norme AFNOR NFT 90015	mg/l de NH ₄	0,02
NITRATES	43	Norme AFNOR NFT 90012	mg/l de NO ₃	0,1
ORTHOPHOSPHATES	46	Norme AFNOR NFT 90023	mg/l de PO ₄	0,1
PHOSPHORE TOTAL	47	Norme AFNOR NFT 90023	mg/l de P	0,1
HYDROCARBURES NON FLOTTANTS	50	Norme AFNOR NFT 90203	mg/l	0,04
PHENOLS	60	Norme AFNOR NFT 90109	mg/l	0,025

Tableau 4 : Indicateurs de pollution mesurés (d'après HEMAIN (1983,a))

- (*) Le LROP (pour les bassins de MAUREPAS et LES ULIS) mesure la DBO5 par la méthode de Winckler alors que le CETE (pour les bassins d'AIX EN PROVENCE) utilise la méthode respirométrique (sonde)
- (**) Le cuivre n'a pas été recherché sur les bassins d'AIX EN PROVENCE
- (***) Pour les métaux, les échantillons sont acidifiés (HNO₃, 1 cc/l) dès leur arrivée au Laboratoire puis conservés dans des récipients en verre. Par la suite, ils sont filtrés (filtration rapide sous vide et sur papier filtre à AIX, sur filtre sans cendre au LROP) avant d'être analysés par absorption atomique.

3. EXPLOITATION DES DONNEES (MES, DBO5, DCO)

Une première phase d'exploitation des données enregistrées au cours de la campagne de mesure a permis d'estimer les charges annuelles entraînées par le ruissellement sur les quatre bassins versants expérimentaux (cf. tableau 5) (HEMAIN (1983,b), SERVAT (1985,a)).

BASSIN	CHARGE ANNUELLE (kg)	INDICATEUR		
		DCO	MES	DBO5
MAUREPAS	Totale	10 000	25 000	1 500
	Par hectare	380	940	55
	Par ha imperméabilisé	630	1 550	95
LES ULIS	Totale	20 000	48 000	3 800
	Par hectare	460	1 100	85
	Par ha imperméabilisé	1 100	2 650	210
AIX ZUP	Totale	11 000	16 000	2 000
	Par hectare	430	630	75
	Par ha imperméabilisé	550	800	100
AIX NORD	Totale	15 000	27 000	2 500
	Par hectare	160	300	30
	Par ha imperméabilisé	470	840	80

Tableau 5 : Charges annuelles calculées sur les bassins versants expérimentaux (kg)

Les ordres de grandeur obtenus (20 à 40 tonnes de MES, 10 à 20 tonnes de DCO, 1 à 3 tonnes de DBO5 par bassin et par an) confirment le fait que la pollution des eaux de ruissellement pluvial est un phénomène bien réel.

Ramenées en terme de concentration, les valeurs moyennes annuelles varient d'un bassin à l'autre de 200 à 500 mg/l pour les MES, de 100 à 300 mg/l pour la DCO et de 15 à 45 mg/l pour la DBO5, chiffres qui sont supérieurs aux normes de rejet des stations d'épuration des eaux usées surtout pour MES et DCO. (Ces normes prévoient qu'au niveau F (niveau le plus sévère) les moyennes sur deux heures ne puissent être supérieures à 20 mg/l pour les MES, 80 mg/l pour la DCO et 20 mg/l pour la DBO5).

L'examen des données a également permis d'avancer d'autres conclusions qu'il convient de retenir avec prudence (SERVAT (1985,a)) :

- les masses annuelles ne sont probablement pas influencées de manière sensible par le régime pluviométrique (à hauteur totale précipitée égale),
- le mode d'occupation des sols n'a pas d'influence sur les rapports des masses annuelles des indicateurs de pollution étudiés. C'est-à-dire que les proportions des masses annuelles de polluants entre elles restent constantes.

4. EVALUATION DES RISQUES DE POLLUTION IMPORTANTE

Un autre objectif de l'étude était d'évaluer les risques de pollutions importantes susceptibles de perturber gravement, à un instant donné, la qualité des eaux du milieu récepteur.

Il est nécessaire, dans ce cas, d'étudier le phénomène à l'échelle d'un événement pluviométrique.

On est alors en mesure d'avancer quelques ordres de grandeur. C'est ainsi qu'à l'examen des données recueillies on peut affirmer que, sur des zones d'habitat de quelques dizaines d'hectares, les charges entraînées au cours d'un événement peuvent atteindre :

- 3 à 7 tonnes de MES,
- 1 à 3 tonnes de DCO,
- 100 à 200 kg de DBO5.

En ce qui concerne les concentrations moyennes maximales, les ordres de grandeur valables pour des zones d'habitat de quelques hectares sont :

- 1 à 4 g/l de MES,
- 600 à 300 mg/l de DCO,
- 100 à 400 mg/l de DBO5.

Les pluies correspondant aux charges élevées sont caractérisées par des hauteurs et/ou des intensités importantes souvent précédées par une longue durée de temps sec. Il faut cependant noter que les débits engendrés par ces événements n'excèdent pas la valeur de période de retour 2 ans environ (HEMAIN (1983,b)).

Pour ce qui est des concentrations moyennes maximales, contrairement aux charges, les valeurs les plus élevées correspondent à des petites pluies caractérisées par une forte intensité et/ou une durée de temps sec importante.

5. POLLUANTS AUTRES QUE MES, DBO5 et DCO

Nous ne donnerons ici que les principales conclusions concernant les polluants autres que MES, DBO5 et DCO, renvoyant le lecteur aux travaux publiés par ailleurs (HEMAIN (1984), SERVAT (1985,a)).

Il semble que le type d'habitat n'ait pas d'effet sensible sur les charges annuelles en métaux. La plupart de ces charges sont certainement liées à la densité du trafic routier. Hormis pour le plomb et le zinc, il est vraisemblable qu'elles n'aient qu'une valeur locale et indicative (cf. tableau 6). Quant aux nutriments, ils sont produits en plus grande quantité sur une zone d'habitat collectif comparativement à une zone pavillonnaire mais l'écart est moindre que pour les matières en suspension et la matière organique. Cette conclusion vaut essentiellement pour l'azote Kjeldahl et le phosphore total, l'interprétation des résultats correspondant aux différentes formes des éléments N et P étant beaucoup plus complexe (cf. tableau 6).

BASSIN INDICATEUR	MAUREPAS		LES ULIS		AIX ZUP		AIX NORD	
Pb	11	(0.41)	13	(0.30)	9	(0.35)	16	(0.17)
Hg	0.13	(0.0049)	0.10	(0.0023)	0.27	(0.011)	0.30	(0.0033)
Zn	44	(1.65)	37	(0,86)	17	(0.66)	21	(0.23)
Cd	0.18	(0.0067)	0.24	(0.0056)	0.11	(0.0043)	0.13	(0.0014)
Ni	1.7	(0.064)	1.5	(0.035)	0.90	(0.035)	1.0	(0.011)
Cr	0.69	(0.026)	0.54	(0.013)	0.17	(0.0066)	0.26	(0.0028)
Cu	2.0	(0.075)	2.3	(0.053)	-		-	
N Kjehl.	440	(16)	720	(17)	300	(12)	300	(3.3)
NH ₄ ⁺	120	(4.5)	200	(4.6)	52	(2.0)	21	(0.23)
NO ₃ ⁻	620	(23)	620	(14)	290	(11)	170	(1.8)
Ortho. PO ₄ ³⁻	150	(5.6)	130	(3.0)	53	(2.1)	30	(0.33)
P total	110	(4.1)	210	(4.9)	66	(2.6)	60	(0.65)
Hydrocarbures	370	(14)	910	(21)	-		-	

Tableau 6 : Polluants autres que MES, DBO5, DCO - Charges annuelles retenues en kg/an et valeurs spécifiques (kg/ha/an) - (d'après HEMAIN (1984))

Nous retiendrons donc que sur des zones d'habitat les eaux de ruissellement pluvial rejettent annuellement dans le milieu récepteur de 0.3 à 0.4 kg/ha de plomb, de 1 à 1,5 kg/ha de zinc, de 10 à 20 kg/ha d'azote Kjeldahl et de 3 à 5 kg/ha de phosphore. Ces ordres de grandeur correspondent à ceux trouvés par ailleurs dans la littérature (RIBSTEIN et DESBORDES (1978), LAVALLEE (1980)).

CHAPITRE 3

EXPLOITATION STATISTIQUE DES DONNEES : MES, DBO5, DCO

1. REPRESENTATIVITE DES DONNEES

Si la technique d'échantillonnage utilisée dans le cadre de la campagne de mesure nationale (une crépine placée à l'intérieur d'un collecteur et reliée à une pompe) ne pose pas de gros problèmes en ce qui concerne les matières dissoutes, il n'en va pas de même pour ce qui est des matières en suspension. Dans ce cas, en effet, les types de transport sont variés (charriage, saltation, suspension) et les échantillonneurs classiques ne sont pas toujours bien adaptés. C'est d'autant plus vrai que l'existence d'éventuels gradients de concentration n'est généralement pas prise en compte. On peut donc se poser le problème de la validité des mesures de MES dont nous disposons ; ce que nous avons fait en reprenant la démarche de VELIKANOV (MILISIC (1978)). Celle-ci consiste à poser, qu'un écoulement dont les caractéristiques hydrauliques sont connues, possède une capacité de transport précisément définie.

Nous avons donc cherché à déterminer le comportement des MES en fonction de leur répartition granulométrique pour diverses conditions d'écoulement (SERVAT (1984), DESBORDES et SERVAT (1986)).

Les résultats des simulations effectuées ont montré que dans la grande majorité des cas les mesures des matières en suspension peuvent être jugées représentatives bien qu'elles aient été effectuées à l'aide d'un seul prélèvement et sans analyse préalable (granulométrie, gradients de concentration, etc.).

Ceci étant, le caractère particulier du polluant MES nous a conduit à imaginer et à proposer un protocole de mesures qui lui soit spécifique. Celui-ci a fait l'objet d'autres publications (SERVAT (1984), DESBORDES et SERVAT (1986)) que l'on pourra trouver en annexes et sur lesquelles nous ne reviendrons pas ici.

2. CARACTERISTIQUES STATISTIQUES

A la suite de travaux antérieurs (DESBORDES et SERVAT (1984), SERVAT (1984), SERVAT (1985,b)) plusieurs variables pluviométriques, débitmétriques et climatiques ont pu être identifiées comme étant principalement liées à la pollution du ruissellement pluvial urbain. Il s'agit de :

- hauteur de pluie (HP,mm),
- intensité moyenne maximale en cinq minutes ($I_{max 5}$, mm/h),
- volume ruisselé (V_r ,m³),
- débit de pointe (Q_{max} , l/s)
- et durée de temps sec (DTS, jours).

L'intensité moyenne maximale en cinq minutes est mesurée en un point (pluviographe) et jugée représentative du bassin versant considéré. Les distributions observées de ces variables ainsi que celles des concentrations et des masses de MES, DBO5 et DCO ont été analysées d'un point de vue statistique pour chaque bassin versant étudié.

L'ensemble des résultats a été porté dans les tableaux 7 à 10 (N.B. : A la suite d'anomalies constatées dans la mesure des volumes ruisselés sur le bassin d'AIX-Nord -volumes anormalement faibles- aucune distribution de masse n'a été étudiée dans ce cas précis). L'examen de ces caractéristiques statistiques permet de tirer certains enseignements généraux :

- pour toutes les variables et pour tous les bassins la dissymétrie est très prononcée avec un coefficient g_1 qui varie entre 1.4 et 7.2 ;
- dans tous les cas la dispersion est extrêmement importante : mode et médiane très différents de la moyenne, écart-type généralement supérieur à la moyenne, écart important entre les valeurs extrêmes, premier quartile faible et troisième quartile proche de la moyenne.

	Concentrations (mg/l)			Masses (kg)			Volume ruiselé (m3)	Débit de pointe (l/s)	Hauteur de pluie (mm)	Intensité max en 5mn (mm/h)	Durée de temps sec (jour)
	MES	DBO5	DCO	MES	DBO5	DCO					
Taille de l'échantillon	119	119	119	96	96	96	119	118	103	97	119
Moyenne	182.4	15.8	106.8	227.9	13.0	85.5	1098.4	235.1	6.0	8.9	2.85
Médiane	126	11	81	60.9	7.4	42.8	455	110	3.4	4.9	1.35
Mode	100	11	81	56.3	7.3	42.3	140	50	1	4.2	0.1
Variance	28597.6	224.5	7890.8	482266	484.0	30893.5	3,07 10 ⁶	181889	60.0	121.4	17.93
Ecart-type	169.1	14.9	88.8	694.5	22.0	175.8	1751.7	426.5	7.7	11.0	4.25
Minimum	17	2	22	4.2	0.11	2.4	28	25	0.4	0.4	0.01
Maximum	894	110	590	5972.6	187.4	1561.9	12495	2820	47.4	58.3	29.35
Ecart entre valeurs extrêmes	877	108	568	5968.4	187.3	1559.5	12467	2795	47.0	57.9	29.34
1er quartile	70	9	52	30.0	2.9	20.7	183	55	1.6	2.8	0.4
3è quartile	224	19	119	155.9	13.9	88.8	1177	220	7	9.4	3.45
Ecart entre 1er et 3è quartile	154	10	67	125.9	11.0	68.1	994	165	5.4	6.6	3.05
Coefficient d'assymétrie	2.2	4.5	2.6	6.7	5.7	6.8	3.5	4.3	2.9	2.7	3.4
Coefficient d'aplatissement	5.5	25.4	8.7	51.6	41.8	54.1	16.4	20.2	9.8	7.7	15.0

Tableau 7 : Bassin versant MAUREPAS
Caractéristiques des principales distributions observées

	Concentrations (mg/l)			Masses (kg)			Volume ruisselé (m ³)	Débit de pointe (l/s)	Hauteur de pluie (mm)	Intensité max en 5mn (mm/h)	Durée de temps sec (jour)
	MES	DBO5	DCO	MES	DBO5	DCO					
Taille de l'échantillon	92	92	92	76	76	76	92	86	87	83	91
Moyenne	515.8	74.3	323.9	426.1	39.7	200.9	1055.4	183.5	6.4	9.6	3.7
Médiane	315	35	204	210.6	27.4	131.6	544	125	4.6	6.3	1.8
Mode	146	35	104	193.2	23.4	122.6	535	80	3	8.3	1.65
Variance	243564	12370	156613	354868	1439.6	48748	1.84 10 ⁶	40333	32.0	106.5	23.3
Ecart-type	493.5	111.2	395.7	595.7	37.9	220.8	1357.1	200.8	5.7	10.3	4.8
Minimum	44	9	42	1.8	0.7	4.3	28	25	0.8	1	0.05
Maximum	2480	666	2720	2853.6	157.4	1070.1	7927	1145	30	56.3	25.4
Ecart entre valeurs extrêmes	2436	657	2678	2851.8	156.7	1065.8	7899	1120	29.2	55.3	25.35
1er quartile	189	22	120.5	81.9	11.9	61.8	223.5	60	2.8	3.3	0.65
3è quartile	640	64	344	405.8	57.2	236.4	1311	210	8.0	10.4	4.25
Ecart entre 1er et 3è quartile	451	42	223.5	323.9	45.3	174.6	1087.5	150	5.2	7.1	3.6
Coefficient d'assymétrie	1.9	3.6	3.6	2.6	1.4	2.1	2.6	2.8	2.0	2.7	2.5
Coefficient d'applatissage	3.4	14.1	16.7	6.9	1.5	4.3	8.4	9.4	4.4	8.5	7.4

Tableau 8 : Bassin versant LES ULIS
Caractéristiques des principales distributions observées

	Concentrations (mg/l)			Masses (kg)			Volume ruisselé (m3)	Débit de pointe (l/s)	Hauteur de pluie (mm)	Intensité max en 5mn (mm/h)	Durée de temps sec (jour)
	MES	DBO5	DCO	MES	DBO5	DCO					
Taille de l'échantillon	74	74	74	69	69	69	74	72	72	72	73
Moyenne	505.7	94.7	448.9	274.7	49.3	206.5	917.7	190.6	7.9	10.0	6.5
Médiane	237	42.5	247	101.0	16.1	119.1	469	71	4.3	5.9	2.6
Mode	68	5	46	70.0	1.0	151.2	56	60	4.2	4.2	0.2
Variante	452424	26994.7	547968	246544	21739	168891	1.54 10 ⁶	114575	76.9	277.2	80.2
Ecart-type	672.6	164.3	740.2	496.5	147.4	410.9	1242.4	338.5	8.8	16.6	8.9
Minimum	13	0	41	19.9	0.0	6.7	27	10	0.4	0.7	0.1
Maximum	3740	1167	5600	3262.0	1199.3	3272.6	6746	2400	43.6	132.6	42.2
Ecart entre valeurs extrêmes	3727	1167	5559	3242.1	1199.3	3265.9	6719	2390	43.2	131.9	42.1
1er quartile	138	18	116	55.1	9.6	50.0	175	39.5	2.3	3.1	0.75
3è quartile	660	103	494	273.6	39.4	206.2	1001	212.5	9.7	10.8	8.7
Ecart entre 1er et 3è quartile	522	85	378	218.5	29.8	156.2	826	173	7.4	7.7	7.95
Coefficient d'assymétrie	3.0	4.5	5.2	4.2	7.2	6.4	2.7	4.5	2.2	5.9	2.3
Coefficient d'applatissement	10.0	25.3	33.2	20.6	56.4	46.8	8.1	25.8	5.0	42.2	5.7

Tableau 9 : Bassin versant AIX-ZUP
Caractéristiques des principales distributions observées

	Concentrations (mg/l)			Masses (kg)			Volume ruisselé (m3)	Débit de pointe (l/s)	Hauteur de pluie (mm)	Intensité max en 5mn (mm/h)	Durée de temps sec (jour)
	MES	DBO5	DCO	MES	DBO5	DCO					
Taille de l'échantillon	56	40	49	-	-	-	-	65	71	67	71
Moyenne	387	70.7	307.5	-	-	-	-	326.9	8.2	10.5	6.4
Médiane	260	24.5	204	-	-	-	-	59	4.2	5.8	2.8
Mode	113	19	120	-	-	-	-	40	2.0	4.2	0.15
Variance	292459	6605.8	70173	-	-	-	-	420569	82.0	212.9	84.5
Ecart-type	540.8	81.3	264.9	-	-	-	-	648.5	9.1	14.6	9.2
Minimum	20	4	48	-	-	-	-	10	0.8	0.9	0.1
Maximum	3780	300	1260	-	-	-	-	4300	49.6	88.8	48
Ecart entre valeurs extrêmes	3760	296	1212	-	-	-	-	4290	48.8	87.9	47.9
1er quartile	116.5	15	121	-	-	-	-	35	2.2	2.8	0.7
3è quartile	413.5	125	416	-	-	-	-	336	11.2	12.5	8.7
Ecart entre 1er et 3è quartile	297	110	295	-	-	-	-	301	9.0	9.7	8
Coefficient d'assymétrie	4.8	1.5	1.8	-	-	-	-	4.2	2.2	3.5	2.6
Coefficient d'applatissage	28.5	1.5	3.4	-	-	-	-	22.3	6.1	14.2	8.0

Tableau 10 : Bassin versant AIX-NORD
Caractéristiques des principales distributions observées

Ces conclusions se vérifient lorsque l'on examine les tracés des histogrammes de fréquence et des courbes de fréquences relatives cumulées. Ils confirment que l'on a affaire à des distributions unimodales à dissymétrie positive très marquée. On trouvera ici à titre d'exemple les graphes correspondant aux concentrations en MES, aux masses de DBO5 et aux durées de temps sec (figures.1 à 6). Les graphes relatifs aux autres variables ont été reportés en annexe.

Les caractéristiques des variables débitométriques sont voisines quel que soit le bassin versant considéré. Il n'en va pas de même pour les variables pluviométriques et pour la durée de temps sec : moyennes et écarts-type sont plus élevés pour les bassins d'AIX-EN-PROVENCE que pour les bassins de la région parisienne. C'est particulièrement sensible dans le cas de la durée de temps sec (DTS) puisqu'il s'agit alors d'un facteur 2.

Il faut également noter des valeurs extrêmes plus élevées à AIX-EN-PROVENCE en matière d'intensité et de durée de temps sec.

Comme on l'a vu précédemment il est, par contre, plus difficile de mettre en évidence une relation entre le régime climatique et les valeurs de pollution enregistrées ; le critère de classification dominant étant plus vraisemblablement le type d'occupation des sols.

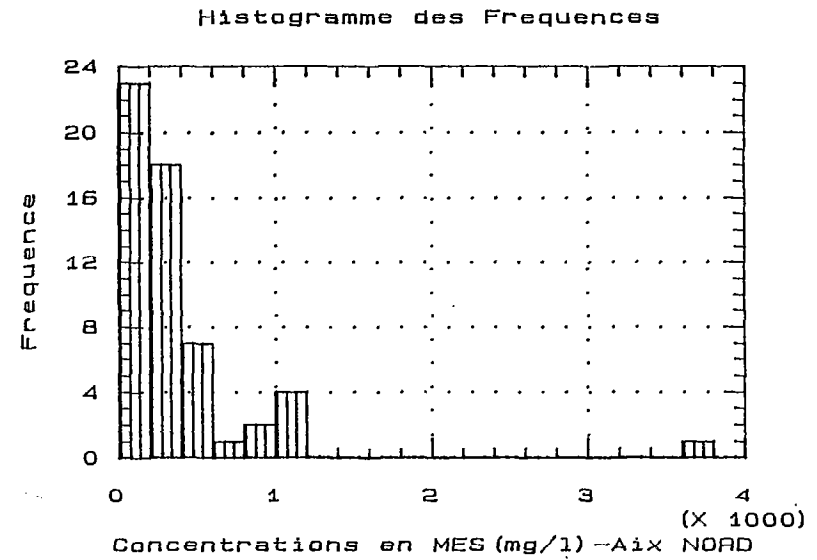
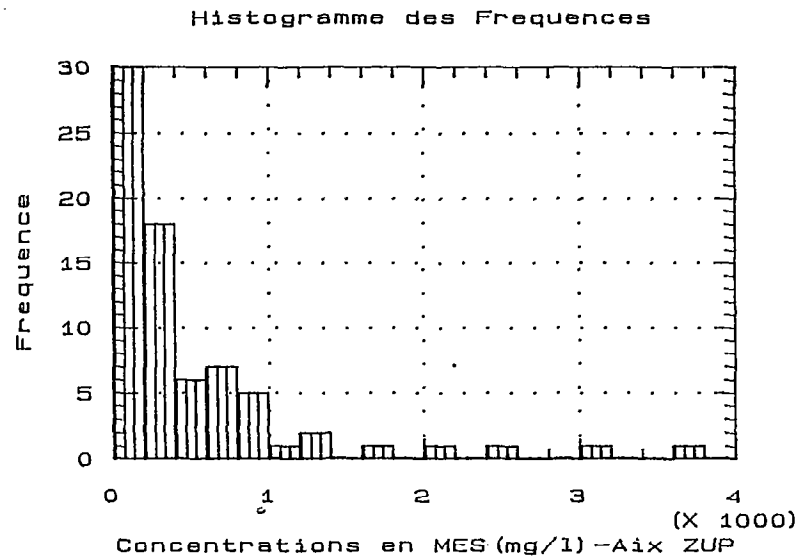
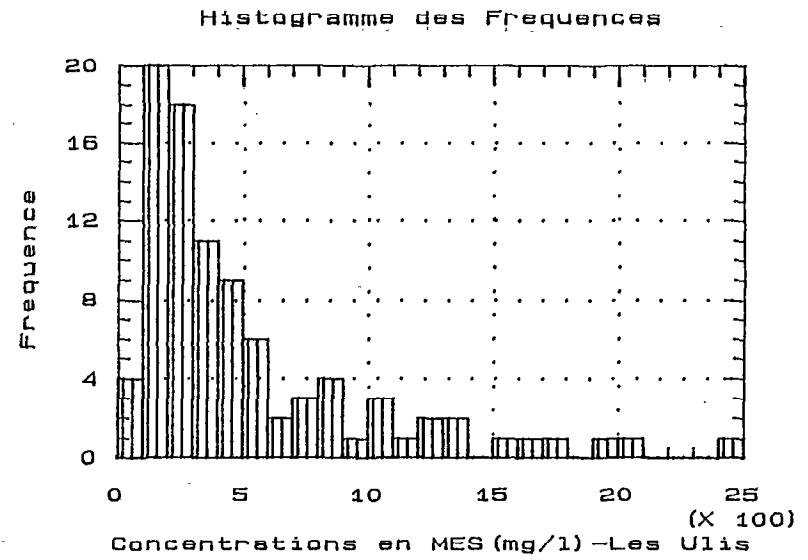
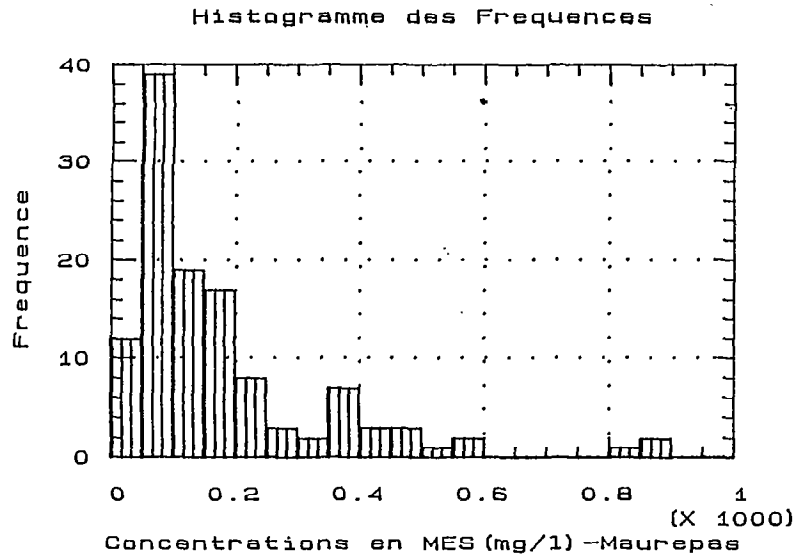


Figure 1

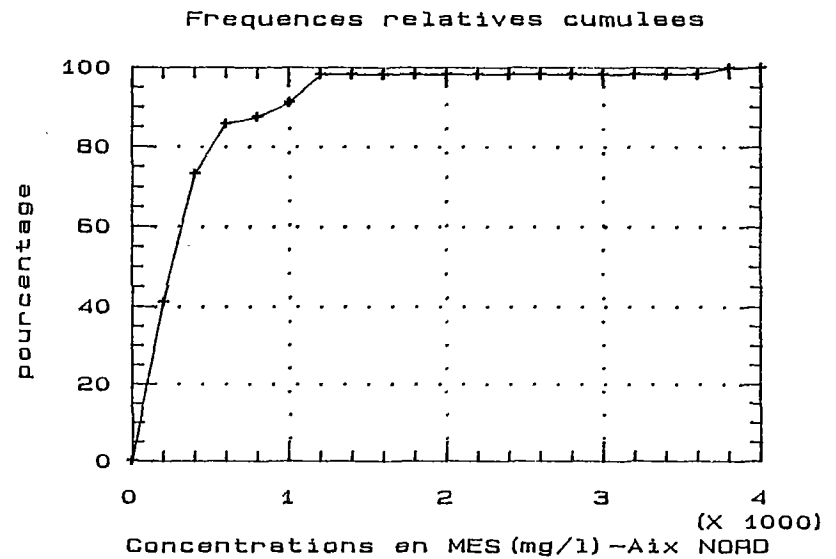
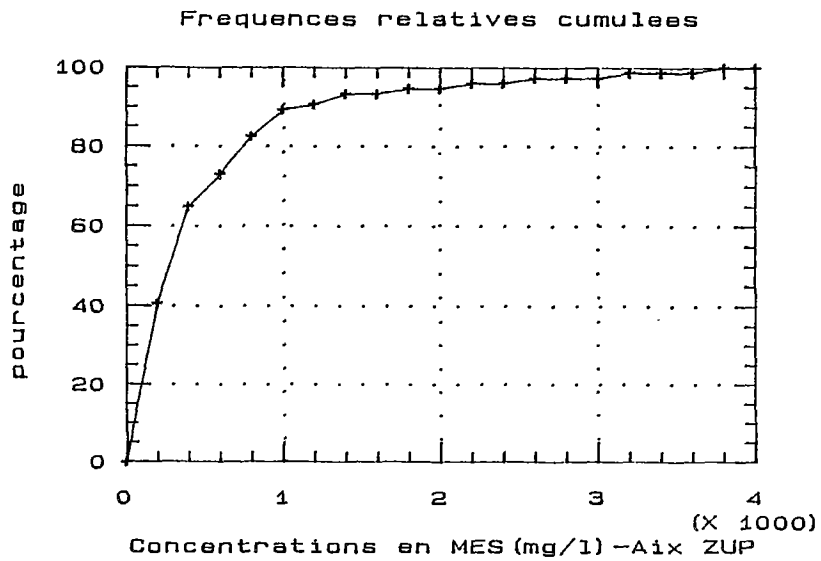
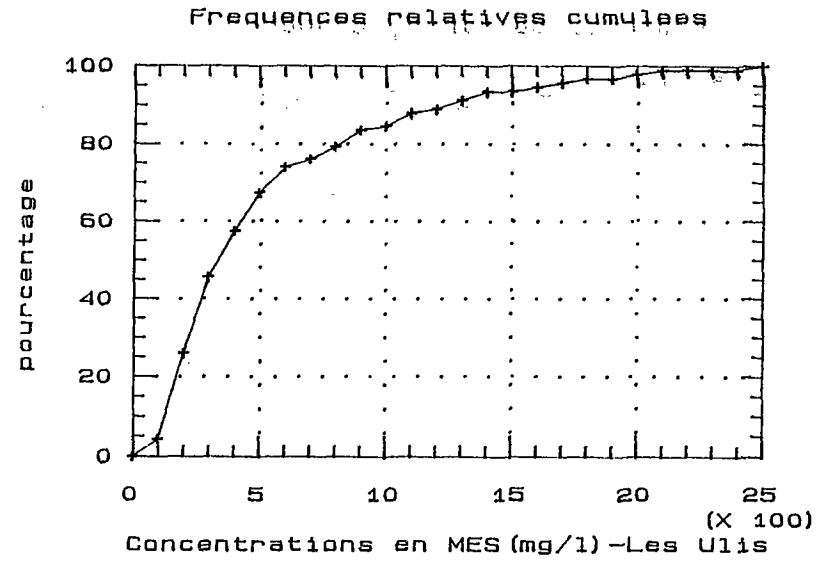
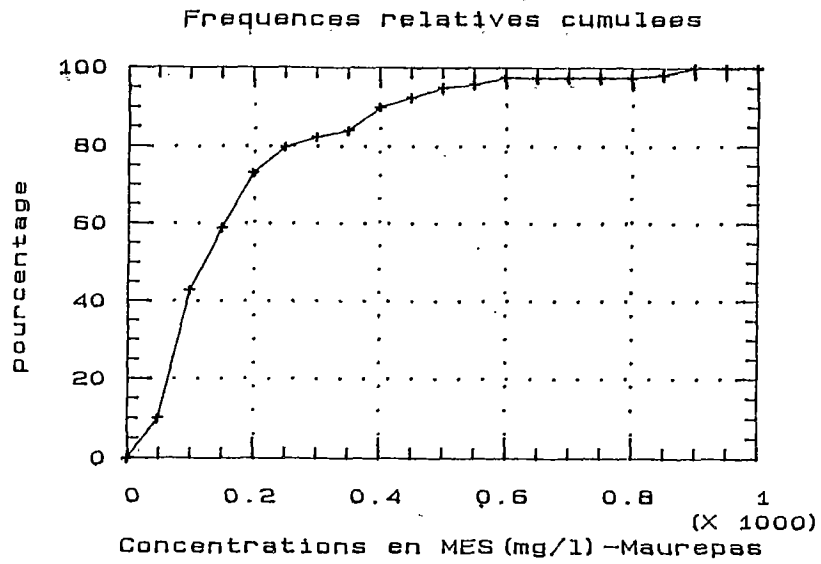


Figure 2

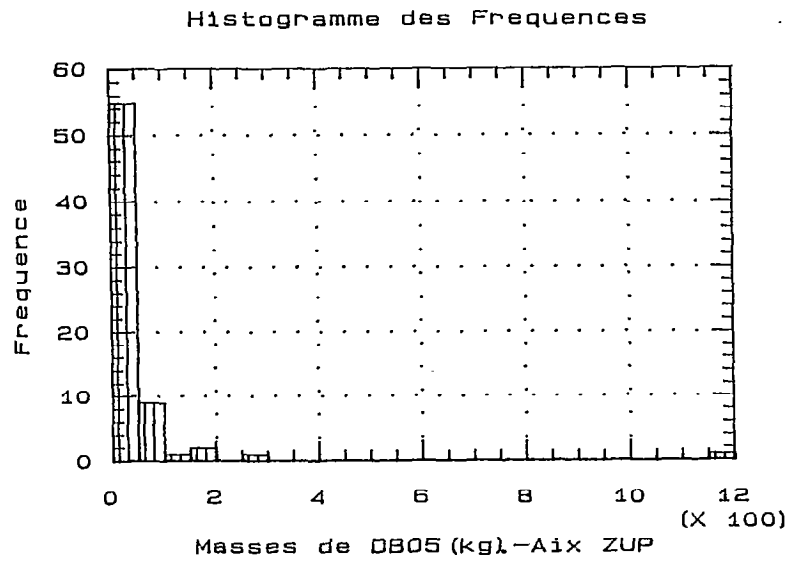
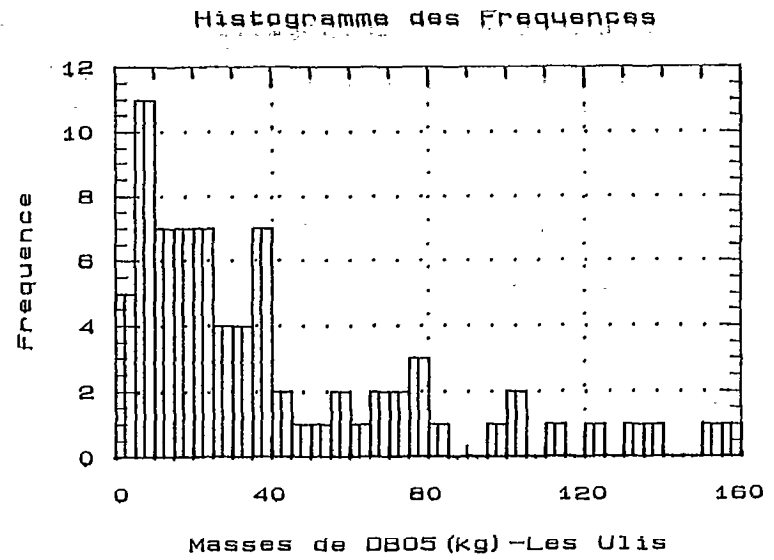
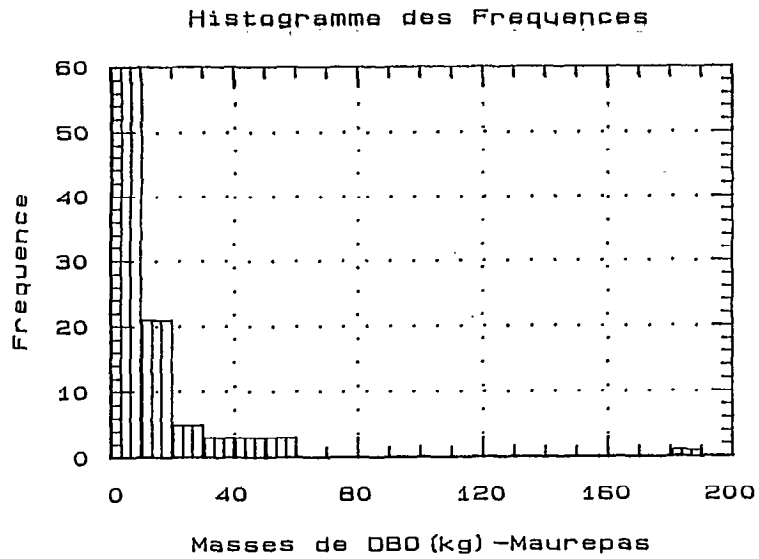


Figure 3

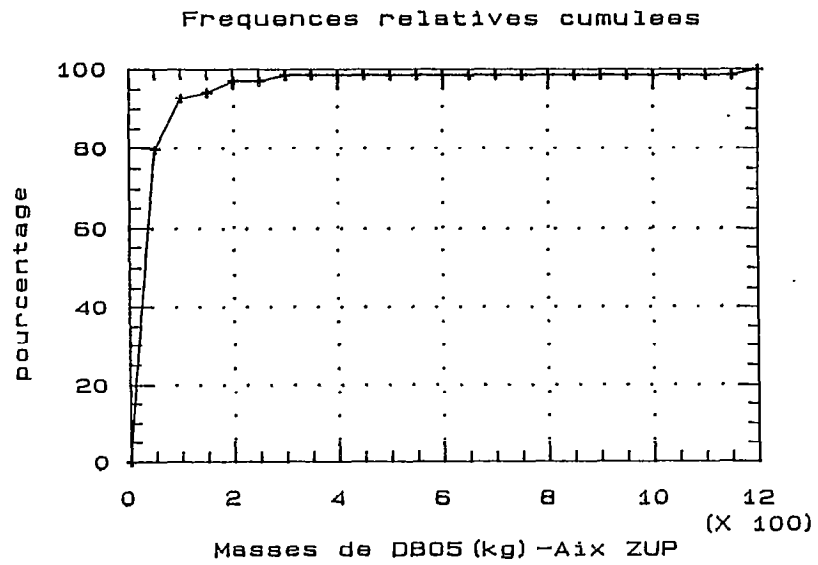
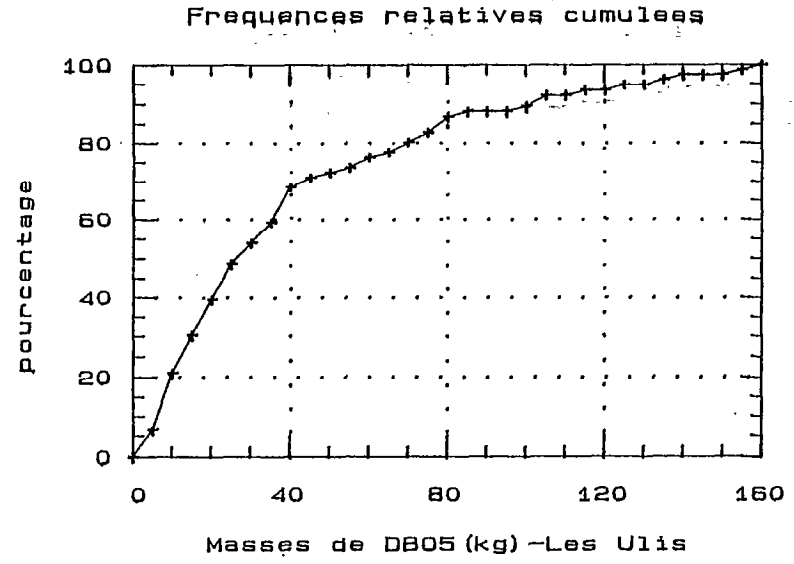
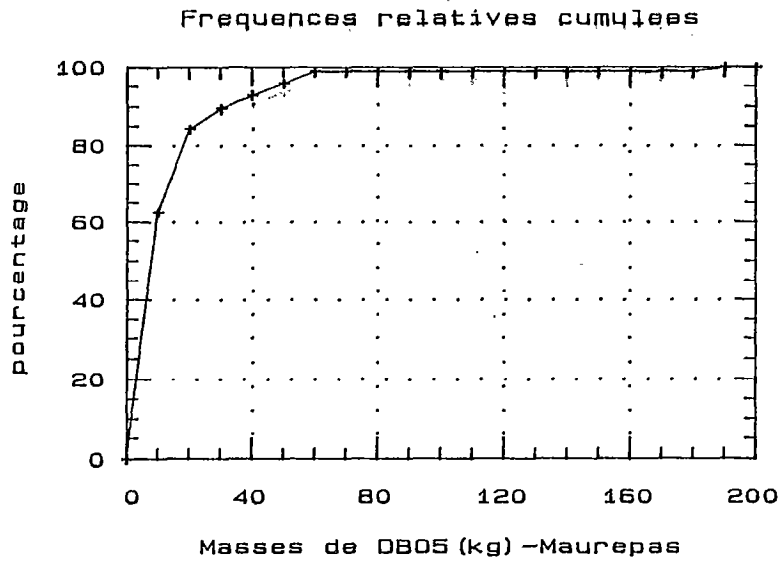


Figure 4

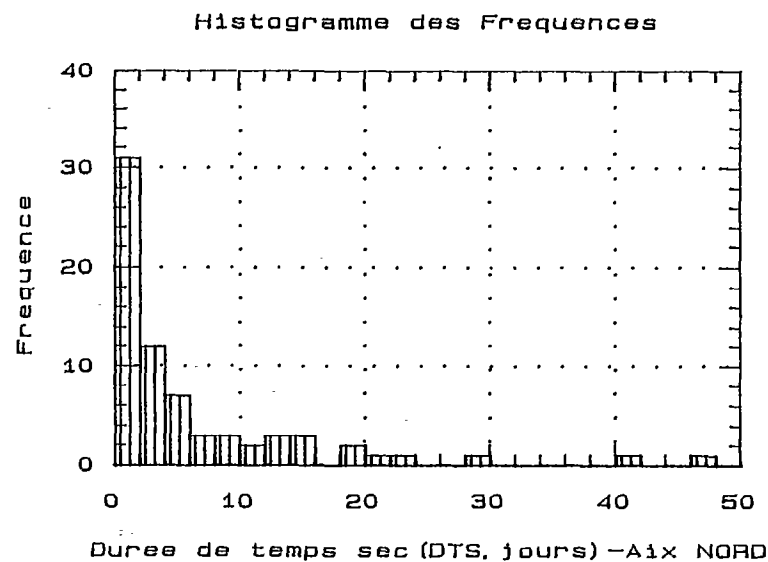
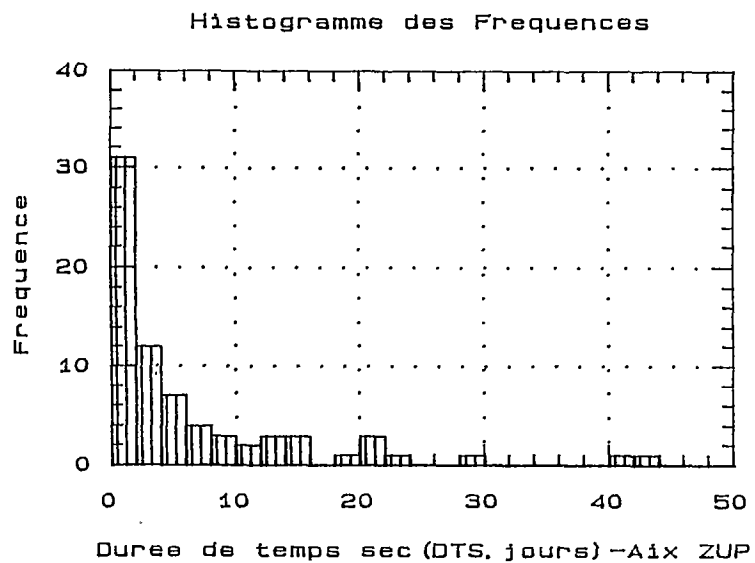
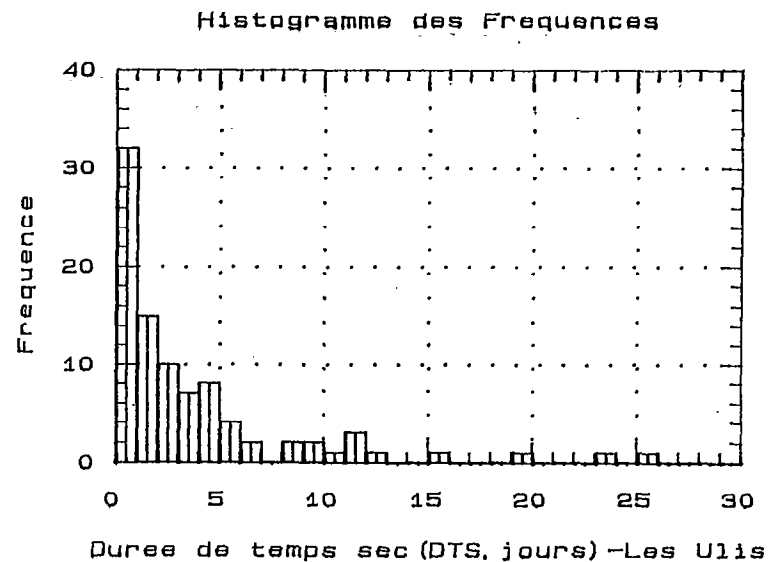
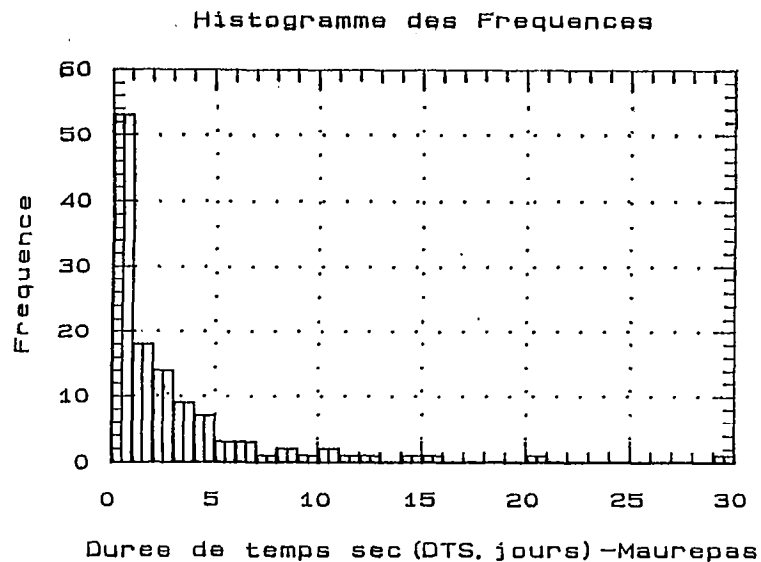


Figure 5

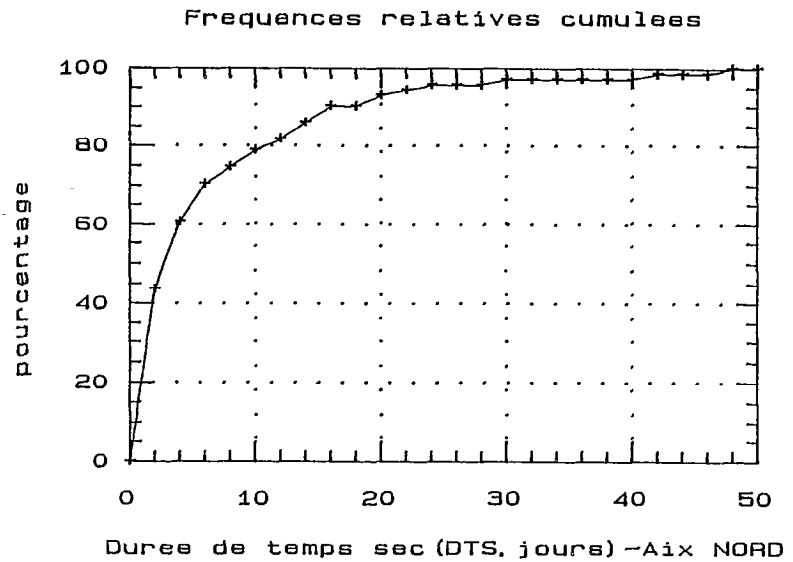
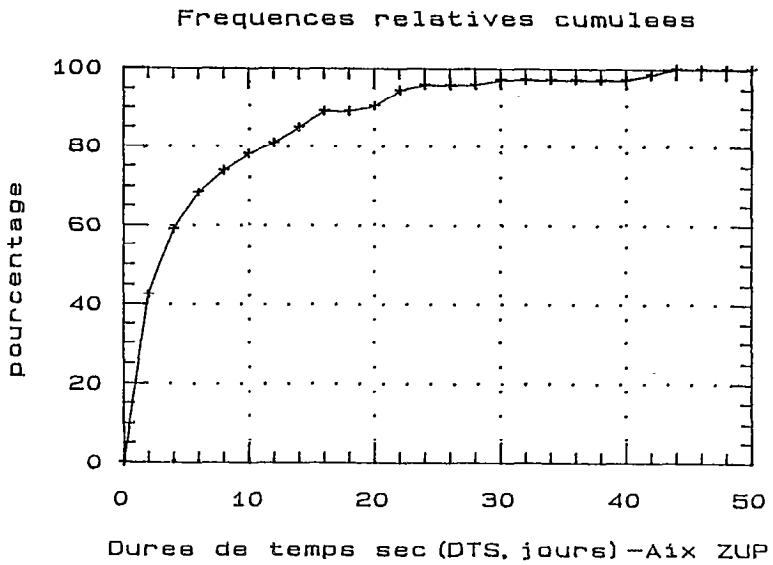
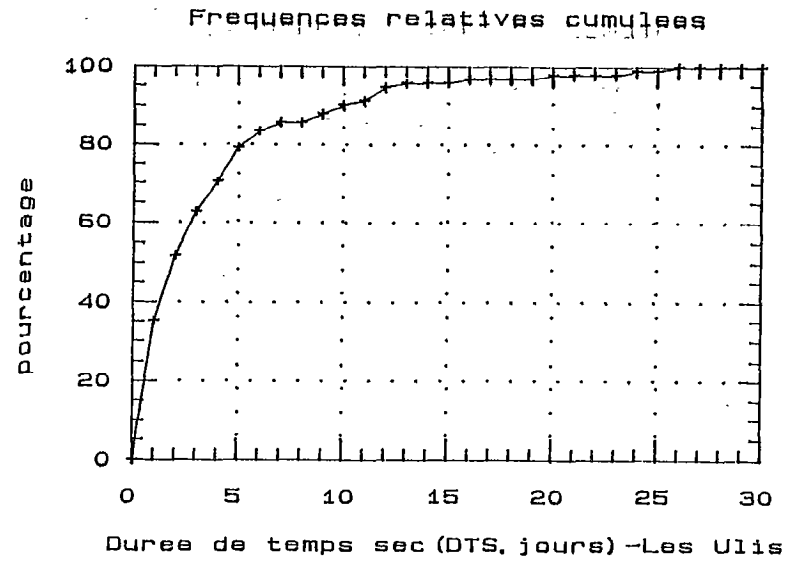
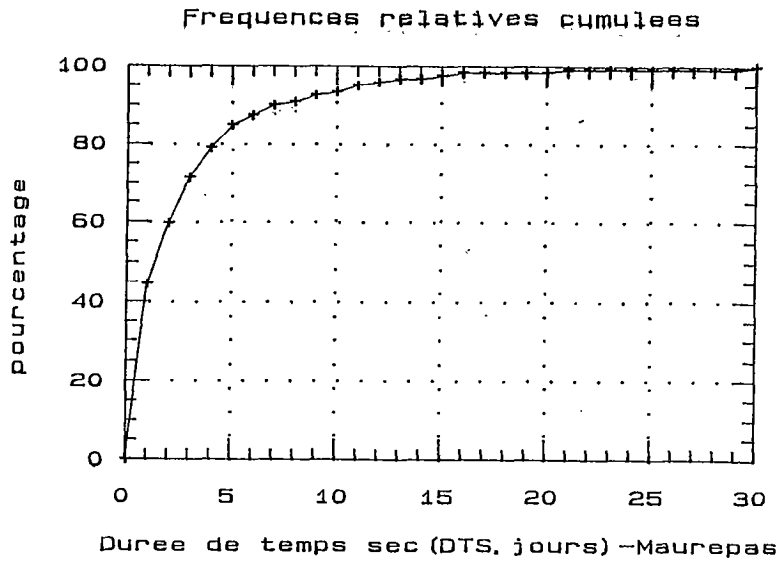


Figure 6

3. AJUSTEMENT DES DISTRIBUTIONS DE CONCENTRATIONS ET DE MASSES DE MES, DBO5 ET DCO

Qu'il s'agisse des concentrations ou des masses de l'un ou l'autre des polluants considérés, les coefficients de dissymétrie de FISHER, g_1 , sont élevés, atteignant dans certains cas des valeurs de l'ordre de 6 ou 7.

Des lois à trois paramètres qui prennent en compte la dissymétrie ont donc dû être ajustées à de telles distributions. L'utilisation d'une loi gamma incomplète ou de Pearson III sur les valeurs naturelles a conduit à des résultats peu satisfaisants, en raison des valeurs particulièrement élevées de g_1 . Appliquée à des variables ayant subi des transformations de type "racine carrée", "racine cubique" ou logarithmique, la loi de Pearson III donne de bons résultats. Ceux-ci se trouvent confirmés par le tracé des intervalles de confiance à 90 %, à l'aide d'une méthode empirique dont la validité repose sur l'hypothèse de normalité de la distribution d'un événement de période de retour T donnée (KITE (1975), KITE (1976)).

On trouvera, à titre d'exemple, les ajustements réalisés pour LES ULIS (DBO5 en masses et concentrations), MAUREPAS (DCO et MES en masses) et AIX-ZUP (DCO en concentrations) respectivement en figures 7 à 11.

$\sqrt{\text{masse DBO5 (kg)}}$

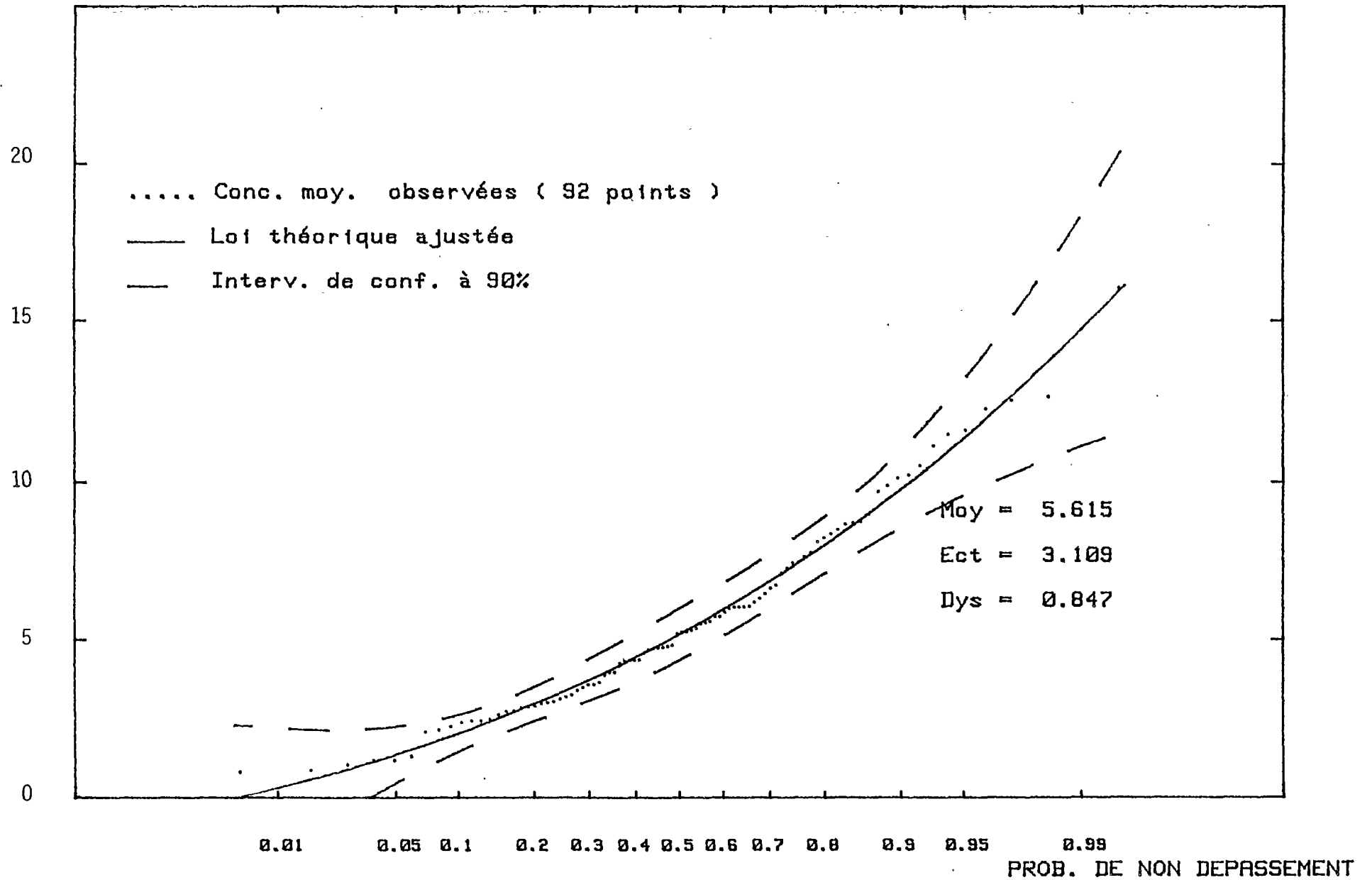


Figure 7 : Ajustement d'une loi de type Pearson III

log (conc. moy. DBO5 (mg/l))

BASSIN VERSANT: LES ULIS

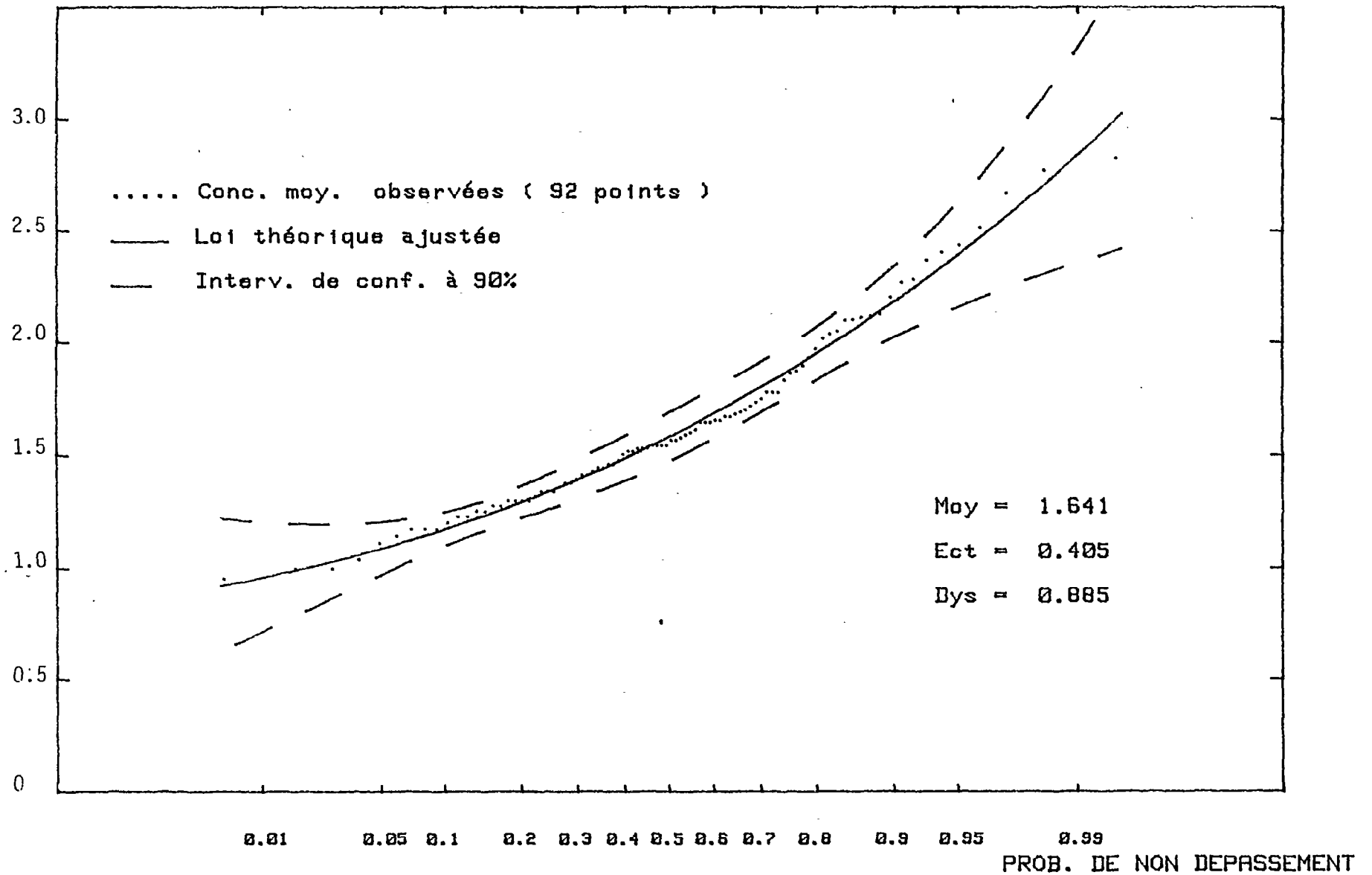


Figure 8 : Ajustement d'une loi de type Pearson III

BASSIN VERSANT : MAUREPAS

log (masse DCO (kg))

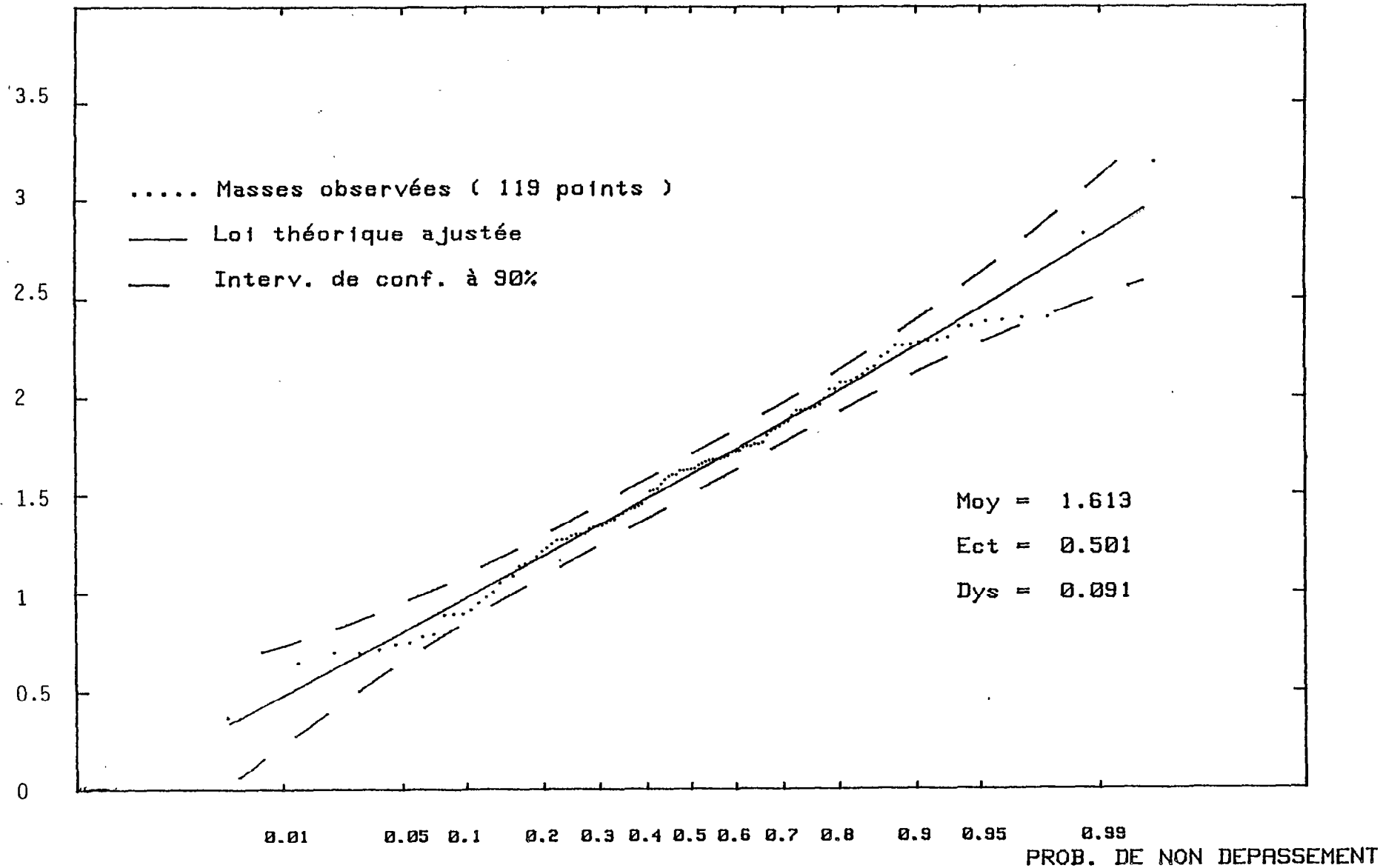


Figure 9 : Ajustement d'une loi de type Pearson III

log (masse MES (kg))

BASSIN VERSANT : MAUREPAS

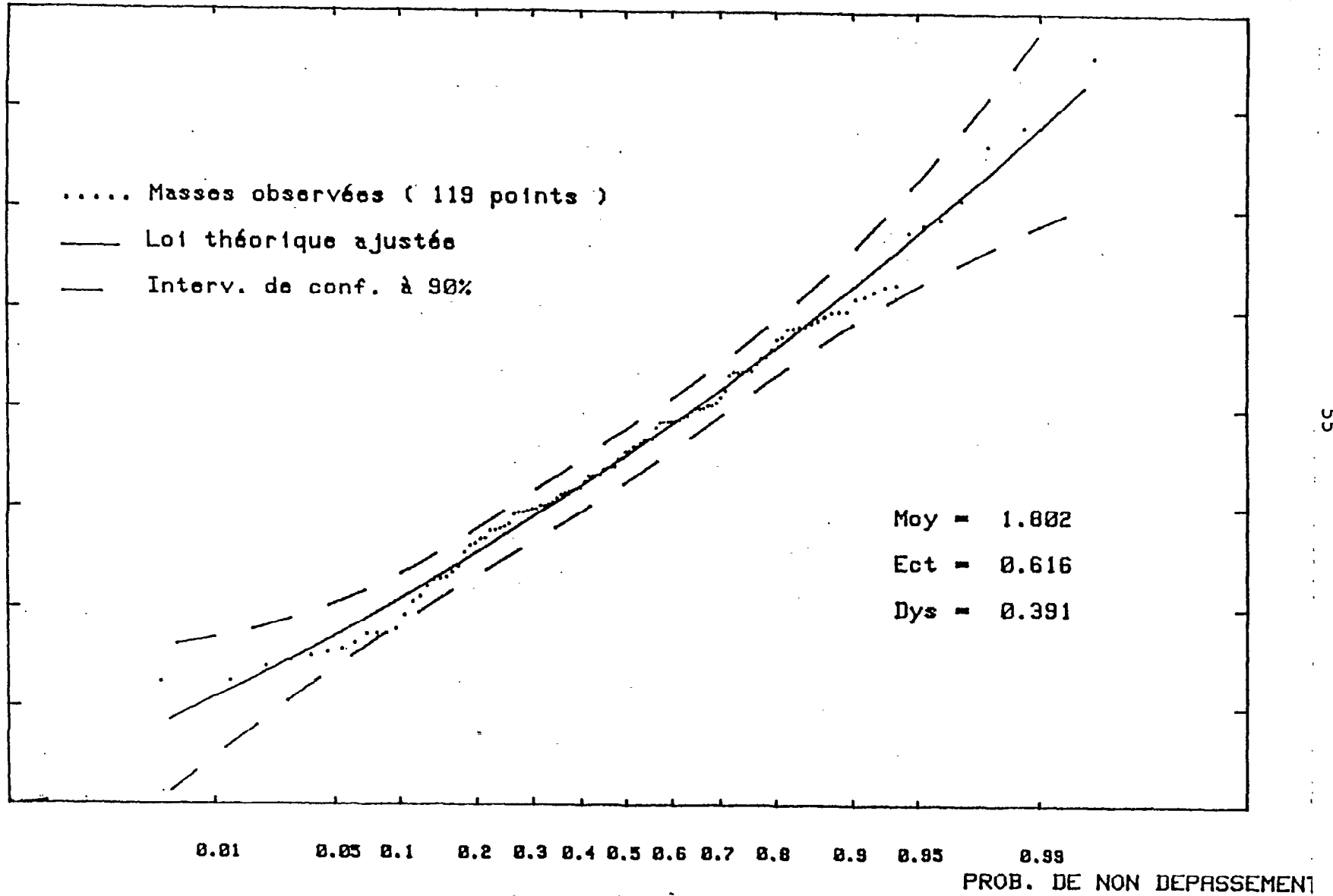


Figure 10 : Ajustement d'une loi de type Pearson III

BASSIN VERSANT: AIX-ZUP

log (conc. moy. DCO (mg/l))

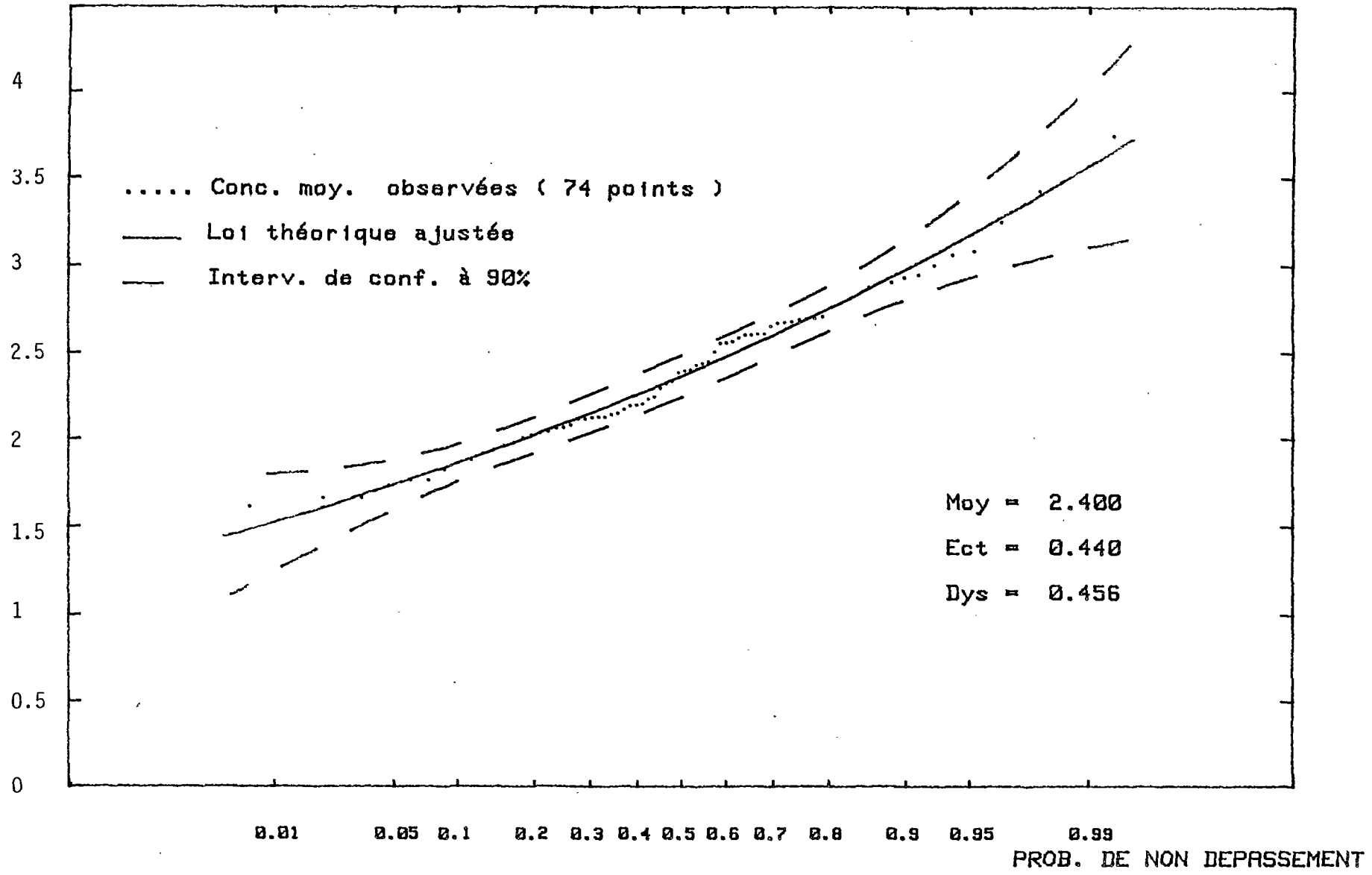


Figure 11 : Ajustement d'une loi de type Pearson III

4. CORRELATION SIMPLE

Les tableaux 11 à 14 (pages suivantes) correspondent aux matrices de corrélation établies pour chacun des bassins versants à partir des variables analysées précédemment : concentrations et masses en MES, DBO5 et DCO, HP, lmax5, Vr, Qmax et DTS.

Les meilleurs coefficients de corrélation simple entre une variable explicative et les concentrations ou les masses transportées ont été reportés dans le tableau 15.

	Concentrations (mg/l)			Masses (kg)		
	MES	DBO5	DCO	MES	DBO5	DCO
MAUREPAS (96 observations)	DTS r = .629	DTS r = .781	DTS r = .609	Vr r = .860	Vr r = .901	Vr r = .842
LES ULIS (76 observations)	DTS r = .597	DTS r = .687	DTS r = .748	Qmax r = .861	Vr r = .718	Qmax r = .767
AIX ZUP (69 observations)	DTS r = .593	DTS r = .616	DTS r = .619	Qmax r = .964	lmax5 r = .879	lmax5 r = .924
AIX NORD (38 observations)	DTS r = .544	DTS r = .480	DTS r = .495	-	-	-

Tableau 15 : Meilleurs coefficients de corrélation simple entre concentrations et masses de polluants et une variable explicative

On remarquera la grande homogénéité de comportement en ce qui concerne les concentrations. Quels que soient le polluant et le bassin versant considérés, c'est toujours la variable DTS qui est retenue avec des coefficients de corrélation compris entre .480 (23 % de variance expliquée) et .781 (61 % de variance expliquée). Cette variable est la seule qui soit représentative de la période d'accumulation entre deux événements pluvieux. C'est certainement insuffisant dans certains cas (faible pourcentage de variance expliquée) mais cela souligne l'importance de cette phase d'accumulation dans le processus global "accumulation-entraînement".

	Concentrations (mg/l)			Masses (kg)			HP (mm)	Imax5 (mm/h)	Vr (m ³)	Qmax (l/s)	DTS (jours)
	MES	DBO5	DCO	MES	DBO5	DCO					
MES (conc. mg/l)	1.000	.722	.828	.272	.247	.267	.019	.341	.057	.251	.629
DBO5 (conc. mg/l)	.722	1.000	.804	-.032	.068	.005	-.187	.084	-.179	-.074	.781
DCO (conc. mg/l)	.828	.804	1.000	-.008	.005	.043	-.242	.022	-.208	-.070	.609
MES (Masses kg)	.272	-.032	-.008	1.000	.924	.946	.784	.571	.860	.777	.235
DBO5 (Masses kg)	.247	.068	.005	.924	1.000	.948	.853	.529	.901	.674	.336
DCO (Masses kg)	.267	.005	.043	.946	.948	1.000	.771	.475	.842	.689	.226
HP (mm)	.019	-.187	-.242	.784	.853	.771	1.000	.568	.978	.739	.228
Imax5 (mm/h)	.341	.084	.022	.571	.529	.475	.568	1.000	.554	.853	.275
Vr (m ³)	.057	-.179	-.208	.860	.901	.842	.978	.554	1.000	.746	.196
Qmax (l/s)	.251	-.074	-.070	.777	.674	.689	.739	.853	.746	1.000	.226
DTS (jours)	.629	.781	.609	.235	.336	.226	.228	.275	.196	.226	1.000

Tableau 11 : Bassin versant MAUREPAS - Matrice de corrélation des principales variables observées

	Concentrations (mg/l)			Masses (kg)			HP (mm)	lmax5 (mm/h)	Vr (m³)	Qmax (l/s)	DTS (jours)
	MES	DBO5	DCO	MES	DBO5	DCO					
MES (cenc. mg/l) °	1.000	.700	.790	.336	.293	.293	-.218	.299	-.206	.146	.597
DBO5 (cenc. mg/l)	.700	1.000	.909	-.113	.079	-.037	-.287	-.077	-.282	-.222	.687
DCO (cenc. mg/l)	.790	.909	1.000	-.039	.093	.063	-.301	-.018	-.289	-.158	.748
MES (Masses kg)	.336	-.113	-.039	1.000	.734	.860	.526	.790	.546	.861	.215
DBO5 (Masses kg)	.293	.079	.093	.734	1.000	.874	.713	.447	.718	.589	.457
DCO (Masses kg)	.293	-.037	.063	.860	.874	1.000	.626	.625	.707	.767	.346
HP (mm)	-.218	-.287	-.301	.526	.713	.626	1.000	.361	.932	.534	.070
lmax5 (mm/h)	.299	-.077	-.018	.790	.447	.625	.361	1.000	.365	.805	.095
Vr (m³)	-.206	-.282	-.289	.546	.718	.707	.932	.365	1.000	.566	.032
Qmax (l/s)	.146	-.222	-.158	.861	.589	.767	.534	.805	.566	1.000	.165
DTS (jours)	.597	.687	.748	.215	.457	.346	.070	.095	.032	.165	1.000

Tableau 12 : Bassin versant LES ULIS - Matrice de corrélation des principales variables observées

	Concentrations (mg/l)			Masses (kg)			HP (mm)	Imax5 (mm/h)	Vr (m ³)	Qmax (l/s)	DTS (jours)
	MES	DBO5	DCO	MES	DBO5	DCO					
MES (conc. mg/l)	1.000	.814	.878	.057	.012	.014	-.241	-.022	-.228	-.014	.593
DBO5 (conc. mg/l)	.814	1.000	.951	-.005	.120	.074	-.202	.013	-.191	-.049	.616
DCO (conc. mg/l)	.878	.951	1.000	-.043	.024	.026	-.236	-.034	-.225	-.092	.619
MES (Masses kg)	.057	-.005	-.043	1.000	.787	.864	.731	.907	.767	.964	.006
DBO5 (Masses kg)	.012	.120	.024	.787	1.000	.948	.532	.879	.534	.841	.056
DCO (Masses kg)	.014	.074	.026	.864	.948	1.000	.594	.924	.616	.900	.012
HP (mm)	-.241	-.202	-.236	.731	.532	.594	1.000	.578	.983	.686	-.115
Imax5 (mm/h)	-.022	.013	-.034	.907	.879	.924	.578	1.000	.606	.958	-.071
Vr (m ³)	-.228	-.191	-.225	.767	.534	.616	.983	.606	1.000	.714	-.154
Qmax (l/s)	-.014	-.049	-.092	.964	.841	.900	.686	.958	.714	1.000	-.073
DTS (jours)	.593	.616	.619	.006	.056	.012	-.115	-.071	-.154	-.073	1.000

Tableau 13 : Bassin versant AIX ZUP - Matrice de corrélation des principales variables observées

	Concentrations (mg/l)			Masses (kg)			HP (mm)	lmax5 (mm/h)	Vr (m ³)	Qmax (l/s)	DTS (jours)
	MES	DBO5	DCO	MES	DBO5	DCO					
MES (Conc. mg/l)	1.000	.462	.598	-	-	-	-.061	.117	-	.419	.544
DBO5 (Conc. mg/l)	.462	1.000	.884	-	-	-	-.315	.024	-	-.120	.480
DCO (Conc. mg/l)	.598	.884	1.000	-	-	-	-.295	-.001	-	-.014	.495
MES (Masses kg)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DBO5 (Masses kg)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DCO (Masses kg)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HP (mm)	-.061	-.315	-.295	-	-	-	1.000	.107	-	.504	-.240
lmax5 (mm/h)	.117	.024	-.001	-	-	-	.107	1.000	-	.153	-.075
Vr (m ³)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Qmax (l/s)	.419	-.120	-.014	-	-	-	.504	.153	-	1.000	-.068
DTS (jours)	.544	.480	.495	-	-	-	-.240	-.075	-	-.068	1.000

Tableau 14 : Bassin versant AIX NORD - Matrice de corrélation des principales variables observées

Il est intéressant de noter que les valeurs prises par le coefficient de corrélation r sont généralement plus faibles pour les bassins versants d'AIX-EN-PROVENCE que pour ceux de la région parisienne. Le faible échantillon de bassins versants concerné ne permet cependant pas d'affirmer que ces résultats sont caractéristiques d'une différenciation régionale et climatique des mécanismes mis en jeu.

La différence est plus marquée lorsque l'on s'intéresse aux masses transportées bien que l'on ne puisse pas en avoir confirmation avec le bassin d'AIX-Nord. En région parisienne, en effet, ce sont les variables débitmétriques (V_r ou Q_{max}) qui sont le mieux corrélées avec les masses transportées, r variant de .718 (52 % de variance expliquée) à .901 (81 % de variance expliquée). Pour AIX-ZUP, par contre, $I_{max 5}$ apparaît deux fois et Q_{max} une fois (masses de MES), mais la liaison entre ces deux variables est particulièrement élevée sur ce bassin ($r = .958$). Concernant les liaisons entre masses transportées et volumes ruisselés il convient cependant de remarquer que : la masse observée est, en fait, le produit de la concentration moyenne en polluant enregistrée au cours d'un événement, et du volume ruisselé correspondant. Les fortes dissymétries de ces deux distributions (quels que soient le bassin et le polluant -cf. §2 chap.2-) sont donc de nature à engendrer des corrélations fallacieuses entre masses transportées et volumes ruisselés.

5. ANALYSE MULTIVARIABLE

5.1. Méthodologie

La méthode utilisée est la méthode classique du "Stepwise", technique de régression progressive couramment décrite dans la littérature (DRAPER et SMITH (1967), CHATFIELD et COLLINS (1980)). A l'aide de cette technique d'analyse nous avons recherché des régressions linéaires multiples permettant d'expliquer au mieux la variance des concentrations moyennes en MES, DBO5 et DCO ainsi que des masses entraînées au cours de chacun des événements pluvieux. Des travaux antérieurs (DESBORDES et SERVAT (1984), SERVAT (1984), SERVAT (1985,b) nous ont conduit à limiter les variables explicatives aux variables décrites plus haut : HP, I_{max5} , V_r , Q_{max} , DTS.

Le "Stepwise" est une technique de régression progressive utilisée ici de manière "ascendante". Le seuil de confiance retenu pour l'entrée ou le rejet d'une variable explicative était de 5 %. C'est-à-dire, que l'on rejette l'hypothèse "corrélation nulle" si :

$$F_{\text{calculé}} \geq F_{\text{critique}} (0,95 ; N-2 \text{ degrés de liberté}) \quad (3.1)$$

avec : F : variable de FISHER

5.2. Résultats

Pour chaque polluant et pour chaque bassin versant, pour les concentrations comme pour les masses, la méthode du "Stepwise" a été appliquée aux valeurs naturelles et aux valeurs après transformation logarithmique.

Dans le premier cas, on se trouve dans une structure additive avec une équation de régression classique du type :

$$Y = \text{Constante} + a X_1 + b X_2 \quad (3.2)$$

Dans le second cas, la structure est multiplicative et l'équation de régression sur les valeurs naturelles a la forme :

$$Y = \text{Constante} X_1^a X_2^b \quad (3.3)$$

ce qui après transformation logarithmique s'écrit :

$$\text{Log } Y = \text{Log Constante} + a \text{Log } X_1 + b \text{Log } X_2 \quad (3.4)$$

soit :
$$Y' = \text{Constante}' + a X'_1 + b X'_2 \quad (3.5)$$

Les équations correspondant aux valeurs naturelles ont été portées dans les tableaux 16 à 18, celles se référant aux valeurs transformées sont dans les tableaux 19 à 21. Cette analyse multivariable n'aurait dû porter que sur des variables strictement indépendantes. Nous avons cependant évité de faire intervenir dans une même équation des couples de variables présentant une forte liaison comme (HP, Vr) ou (Qmax, lmax5).

	Equation "STEPWISE"	Coefficient de corrélation	Coef. de détermination
MAUREPAS	Concent. $C_{MES} = 112.52 - 7.04 HP + 5.64 I_{max5} + 24.22 DTS$	.692	.479
	Masses $M_{MES} = - 173.50 + 0.24 Vr + 0.47 Q_{max} + 7.16 DTS$	.881	.776
LES ULIS	Concent. $C_{MES} = 315.04 - 34.34 HP + 18.75 I_{max5} + 65.40 DTS$	.731	.535
	Masses $M_{MES} = - 47.56 + 2.45 Q_{max}$	.861	.741
AIX ZUP	Concent. $C_{MES} = 220.65 + 45.00 DTS$	.593	.351
	Masses $M_{MES} = - 55.33 + 0.07 Vr + 1.24 Q_{max} + 5.18 DTS$	.974	.948
AIX NORD	Concent. $C_{MES} = - 19.68 + 0.66 Q_{max} + 50.12 DTS$	.690	.476
	Masses -----	-	-

Tableau 16 : Analyse multivariable des données de MES enregistrées sur les bassins versants expérimentaux. Valeurs naturelles

	Equation "STEPWISE"	Coefficient de corrélation	Coef. de détermination
MAUREPAS	Concent. $C_{DBO5} = 11.90 - 0.78 HP + 3.23 DTS$	.864	.746
	Masses $M_{DBO5} = - 0.90 + 0.01 Vr + 0.84 DTS$	.914	.835
LES ULIS	Concent. $C_{DBO5} = 58.22 - 0.13 Q_{max} - 4.47 HP + 19.7 DTS$	.778	.605
	Masses $M_{DBO5} = - 1.54 + 0.02 Vr + 0.63 I_{max5} + 3.56 DTS$	.848	.720
AIX ZUP	Concent. $C_{DBO5} = 23.05 + 11.49 DTS$	.616	.379
	Masses $M_{DBO5} = - 40.97 + 7.70 I_{max5} + 1.92 DTS$	.883	.780
AIX NORD	Concent. $C_{DBO5} = 42.51 + 5.64 DTS$	.480	.230
	Masses -----	-	-

Tableau 17 : Analyse multivariable des données de DBO5 enregistrées sur les bassins versants expérimentaux. Valeurs naturelles

	Equation "STEPWISE"	Coefficient de corrélation	Coef. de détermination
Concent. MAUREPAS	$C_{DCO} = 93.86 - 4.65 HP + 14.83 DTS$	.717	.513
Masses	$M_{DCO} = - 11.46 + 0.07 Vr + 0.05 Qmax + 2.12 DTS$	.844	.712
Concent. LES ULIS	$C_{DCO} = 229.30 - 26.11 HP + 73.27 DTS$	.823	.677
Masses	$M_{DCO} = - 16.60 + 0.07 Vr + 0.51 Qmax + 12.4 DTS$	.865	.749
Concent. AIX ZUP	$C_{DCO} = 120.59 + 52.01 DTS$	.619	.383
Masses	$M_{DCO} = - 19.20 + 22.32 lmax5$	.924	.854
Concent. AIX NORD	$C_{DCO} = 225.71 + 20.01 DTS$	.495	.245
Masses	-----	-	-

Tableau 18 : Analyse multivariable des données de DCO enregistrées sur les bassins versants expérimentaux. Valeurs naturelles

	Equation "STEPWISE"	Coefficient de corrélation	Coef. de détermination
MAUREPAS	Concent. $C_{MES} = 2.10 + 0.75 Q_{max} - 0.75 HP + 0.25 DTS$	.680	.463
	Masses $M_{MES} = -2.07 + 0.37 Vr + 0.80 Q_{max} + 0.20 DTS$	.917	.840
LES ULIS	Concent. $C_{MES} = 5.22 + 0.62 l_{max 5} - 0.46 HP + 0.29 DTS$	.747	.559
	Masses $M_{MES} = -0.68 + 0.72 Vr + 0.65 l_{max 5} + 0.26 DTS$	.917	.841
AIX ZUP	Concent. $C_{MES} = 8.08 - 1.05 Vr + 0.85 Q_{max} + 0.16 DTS$	.747	.558
	Masses $M_{MES} = 1.37 + 0.37 Vr + 0.59 l_{max 5} + 0.16 DTS$	.760	.578
AIX NORD	Concent. $C_{MES} = 3.68 + 0.67 Q_{max} - 0.76 HP$	.644	.414
	Masses -----	-	-

Tableau 19 : Analyse multivariable des données de MES enregistrées sur les bassins versants expérimentaux. Valeurs après transformation logarithmique (les noms des variables correspondent en fait à leurs logarithmes)

	Equation "STEPWISE"	Coefficient de corrélation	Coef. de détermination
MAUREPAS	Concent. $C_{DBO5} = 2.10 + 0.18 Q_{max} - 0.39 HP + 0.27 DTS$	.640	.410
	Masses $M_{DBO5} = 3.06 + 0.76 Vr + 0.09 l_{max 5} + 0.25 DTS$	.927	.859
LES ULIS	Concent. $C_{DBO5} = 5.93 - 0.45 Vr + 0.22 l_{max 5} + 0.46 DTS$	.849	.721
	Masses $M_{DBO5} = -0.98 + 0.55 Vr + 0.22 l_{max 5} + 0.46 DTS$	.903	.815
AIX ZUP	Concent. $C_{DBO5} = 6.27 - 0.86 Vr + 0.49 Q_{max} + 0.47 DTS$	.660	.436
	Masses $M_{DBO5} = -0.61 + 0.14 Vr + 0.48 Q_{max} + 0.46 DTS$	.577	.333
AIX NORD	Concent. $C_{DBO5} = 3.37 + 0.33 DTS$	.398	.158
	Masses -----	-	-

Tableau 20 : Analyse multivariable des données de DBO5 enregistrées sur les bassins versants expérimentaux. Valeurs après transformation logarithmique (les noms des variables correspondent en fait à leurs logarithmes)

	Equation "STEPWISE"	Coefficient de corrélation	Coef. de détermination
Concent. MAUREPAS	$C_{DCO} = 3.41 + 0.36 Q_{max} - 0.63 HP + 0.22 DTS$	.684	.468
Masses	$M_{DCO} = -0.72 + 0.68 Vr + 0.12 l_{max 5} + 0.18 DTS$	.897	.804
Concent. LES ULIS	$C_{DCO} = 7.30 - 0.45 Vr + 0.38 l_{max 5} + 0.34 DTS$	.847	.717
Masses	$M_{DCO} = 0.39 + 0.55 Vr + 0.38 l_{max 5} + 0.34 DTS$	.920	.847
Concent. AIX ZUP	$C_{DCO} = 8.01 - 0.66 Vr + 0.29 Q_{max} + 0.23 DTS$	.713	.509
Masses	$M_{DCO} = 1.18 + 0.48 Vr + 0.22 l_{max 5} + 0.23 DTS$	.721	.520
Concent. AIX NORD	$C_{DCO} = 4.66 + 0.33 Q_{max} - 0.52 HP + 0.22 DTS$	.531	.282
Masses	-----	-	-

Tableau 21 : Analyse multivariable des données de DCO enregistrées sur les bassins versants expérimentaux. Valeurs après transformation logarithmique (les noms des variables correspondent en fait à leurs logarithmes)

En ce qui concerne les concentrations en valeurs naturelles on notera la similitude affichée par les équations de régression multiple pour les bassins versants de la région parisienne : même nombre de variables explicatives et bien souvent mêmes variables, pour des coefficients de détermination assez voisins. Par contre, les équations sont généralement limitées à un seul terme pour les bassins d'AIX-EN-PROVENCE.

Pour ce qui est des masses en valeurs naturelles, l'homogénéité des bassins de la région parisienne est moins nette. Les coefficients de détermination sont cependant élevés puisque tous bassins confondus, ils s'étalent entre 0.712 (masses DCO, MAUREPAS) et 0.948 (masses MES, AIX-ZUP).

Les équations correspondant aux concentrations en valeurs transformées ne révèlent rien de particulier si ce n'est la prise en compte de plusieurs variables pour les bassins d'AIX-EN-PROVENCE. Par contre, au niveau des masses en valeurs transformées, on notera la répétition de la combinaison de variables faisant intervenir Vr, I_{max5} et DTS. Celle-ci est retenue 7 fois sur 9 et correspond à une équation de régression non linéaire sur les valeurs naturelles de la forme :

$$\text{Masse de polluant transportée} = K V_r^a I_{\max 5}^b DTS^c \quad (3.6)$$

Les coefficients de corrélation calculés après transformation logarithmique n'ont pas grande signification. Pour comparer les différents résultats, nous avons préféré revenir aux équations initiales :

$$Y = \text{Constante} + a X_1 + b X_2 \quad (\text{forme 1}) \quad (3.7)$$

et

$$Y = \text{Constante} X_1^a X_2^b \quad (\text{forme 2}) \quad (3.8)$$

en utilisant deux critères :

- la moyenne des carrés des écarts entre valeurs calculées et observées :

$$\frac{1}{N} \sum (Y_c - Y_o)^2 \quad (3.9)$$

- la moyenne pondérée des écarts absolus entre valeurs calculées et observées. Le coefficient de pondération retenu est le rapport de la valeur observée à la moyenne des valeurs observées. Ce facteur privilégie les événements importants ce qui est intéressant au regard des masses transportées et dans l'optique d'une évaluation globale sur une longue durée :

$$\frac{1}{N} \sum \left[\left| Y_c - Y_o \right| \frac{Y_o}{\bar{Y}_o} \right] \quad (3.10)$$

L'ensemble de ces éléments de comparaison a été reporté dans les tableaux 22 à 25. Leur examen montre que, quel que soit le critère considéré, la régression linéaire présente généralement de meilleurs résultats. Cependant, et mis à part le cas d'AIX-ZUP, les valeurs des critères restent voisines.

En outre, la régression linéaire pose deux problèmes d'ordre conceptuel :

- la génération de valeurs négatives dans certains cas, tant en concentrations qu'en masses,
- l'existence d'une ordonnée à l'origine.

Dans le cadre d'une modélisation notre préférence irait donc à la régression non linéaire de type

$$Y = c X_1^a X_2^b \quad (3.11)$$

avec le souci d'en améliorer l'adéquation en utilisant des méthodes d'optimisation non linéaire.

Nous y reviendrons plus loin.

CRITERE	$\frac{1}{N} \sum (Y_c - Y_o)^2$		$\frac{1}{N} \sum \left[ |Y_c - Y_o| * \frac{Y_o}{Y_o} \right]$	
	FORME 1 (+)	FORME 2 (*)	FORME 1 (+)	FORME 2 (*)
Type de pollution :				
Conc. MES	15175	16156	134	150
Masse MES	105717 (nég)	115312	821 (nég)	985
Conc. DBO5	64 (nég)	74	7 (nég)	11
Masse DBO5	77 (nég)	88	15 (nég)	15
Conc. DCO	4006	4344	63	75
Masse DCO	8541 (nég)	9952	177 (nég)	207

. (nég) signifie que l'équation correspondante a généré des valeurs négatives.

Tableau 22 : Bassin versant : MAUREPAS - Comparaison des performances des équations de régression retenues par la méthode du Stepwise.

CRITERE	$\frac{1}{N} \sum (Y_c - Y_o)^2$		$\frac{1}{N} \sum \left[ |Y_c - Y_o| \cdot \frac{Y_o}{Y_o} \right]$	
	FORME 1 (+)	FORME 2 (*)	FORME 1 (+)	FORME 2 (*)
Type de pollution :				
Conc. MES	109728 (nég)	121896	363 (nég)	406
Masse MES	90315	108315	392	424
Conc. DBO5	5340 (nég)	4559	106 (nég)	114
Masse DBO5	382	429	19	18
Conc. DCO	56068 (nég)	60851	263 (nég)	288
Masse DCO	11606	13268	132	142

. (nég) signifie que l'équation correspondante a généré des valeurs négatives.

Tableau 23 : Bassin versant : LES ULIS - Comparaison des performances des équations de régression retenues par la méthode du Stepwise.

CRITERE	$\frac{1}{N} \sum (Y_c - Y_o)^2$		$\frac{1}{N} \sum \left[ \left| Y_c - Y_o \right| * \frac{Y_o}{Y_o} \right]$	
	FORME 1 (+)	FORME 2 (*)	FORME 1 (+)	FORME 2 (*)
Type de pollution :				
Conc. MES	303944	199950	722	670
Masse MES	12024 (nég)	29821	134 (nég)	270
Conc. DBO5	17621	9365	226	177
Masse DBO5	4569 (nég)	12854	120 (nég)	203
Conc. DCO	355844	295749	975	1017
Masse DCO	24457 (nég)	40805	194 (nég)	486

. (nég) signifie que l'équation correspondante a généré des valeurs négatives.

Tableau 24: Bassin versant : AIX ZUP - Comparaison des performances des équations de régression retenues par la méthode du Stepwise.

CRITERE	$\frac{1}{N} \sum (Y_c - Y_o)^2$		$\frac{1}{N} \sum \left[ \left| Y_c - Y_o \right| \cdot \frac{Y_o}{Y_c} \right]$	
EQUATION DE REGRESSION	FORME 1 (+)	FORME 2 (*)	FORME 1 (+)	FORME 2 (*)
Type de pollution :				
Conc. MES	180138	203092	592	695
Masse MES	-	-	-	-
Conc. DBO5	5080	5397	87	107
Masse DBO5	-	-	-	-
Conc. DCO	58911	51595	263	264
Masse DCO	-	-	-	-

. (nég) signifie que l'équation correspondante a généré des valeurs négatives.

Tableau 25: Bassin versant : AIX NORD - Comparaison des performances des équations de régression retenues par la méthode du Stepwise.

6. ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

(DESBORDES et SERVAT (1984), SERVAT (1984), SERVAT (1985,b))

6.1. Méthodologie

L'analyse en composantes principales (A.C.P.) permet d'étudier les variations simultanées de variables interdépendantes.

Pour une série d'observations, le calcul des composantes principales, combinaisons linéaires non corrélées entre elles des variables observées, fournit des indices permettant de distinguer ces observations (HAAN (1977)).

On constate fréquemment que les deux ou trois premières composantes expliquent 90 à 95 % de la variance simultanée. On pourra dans ce cas représenter les observations dans un système de deux axes orthogonaux constitués par les deux premières composantes principales. Certains regroupements de points peuvent s'y mettre en évidence. Reste alors à les caractériser afin de déterminer certaines spécificités, certaines associations de variables qui leur soient propres ou encore certaines simplifications dans le protocole de mesure.

Dans le cas présent, nous avons appliqué la technique d'analyse en composantes principales à un ensemble de 15 variables qui décrivent globalement ce que l'on peut appeler un "événement" au regard des trois facteurs de pollution que sont les MES, la DBO5 et la DCO.

Les 15 variables retenues sont les suivantes :

- (1) le facteur de pollution exprimé en concentration ou en masse
- (2) VR : volume ruisselé en m³
- (3) DR : durée de ruissellement (en jours)

- (4) Q_{max} : débit de pointe (en l/s)
- (5) Q_s : débit de temps sec (en l/s)
- (6) HP : hauteur de pluie précipitée durant l'événement considéré (mm)
- (7) DP : durée de pluie (en jours)
- (8) ITC : intensité moyenne maximale sur une durée égale au temps de concentration (mm/h)
- (9) I_{max5} : intensité moyenne maximale durant un intervalle de temps de 5 minutes (mm/h)
- (10) DTS : durée de la période de temps sec précédant l'événement considéré (en jours)
- (11) $HEPRUI$: hauteur d'eau précipitée au cours de l'événement précédent (en mm)
- (12) $HDERUI$: hauteur d'eau précipitée depuis le dernier événement ayant occasionné un ruissellement (en mm)
- (13) $H7$: hauteur d'eau précipitée au cours des 7 jours précédant l'événement considéré (en mm)
- (14) $H14$: hauteur d'eau précipitée au cours des 14 jours précédant l'événement considéré (en mm)
- (15) $H28$: hauteur d'eau précipitée au cours des 28 jours précédant l'événement considéré (en mm)

$HDERUI$ est une variable qui caractérise l'humidité persistante entre deux événements pluviométriques. Elle prend en compte certains phénomènes comme la rosée ou le brouillard qui ne provoquent pas de ruissellement mais qui peuvent avoir une influence sur la structure des dépôts.

6.2. Résultats

Les figures 12 et 13 sont données à titre d'exemple des tracés permettant de visualiser les caractéristiques de chacun des axes et les éventuels regroupements entre événements (cas particulier présenté : bassin versant des ULIS et concentrations en DBO5). Ceux-ci n'étant pas significatifs pour l'ensemble des tracés, nous avons préféré regrouper les résultats intéressants en plusieurs tableaux.

6.2.1. MES

Pour les concentrations moyennes comme pour les masses (cf. tableaux 26 et 28), il apparaît difficile de franchir la barre des 70 % de variance expliquée à l'aide des trois premières composantes principales.

Les liaisons "variables-composantes principales" sont assez peu marquées. Les tableaux 27 et 29 présentent les variables qui semblent caractériser chacun des axes tant pour les concentrations que pour les masses :

- l'axe n° 1 apparaît comme représentatif des variables débitmétriques et pluviométriques,
- l'axe n° 2 représente une composante climatique,
- l'axe n° 3 est impossible à caractériser précisément.

ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

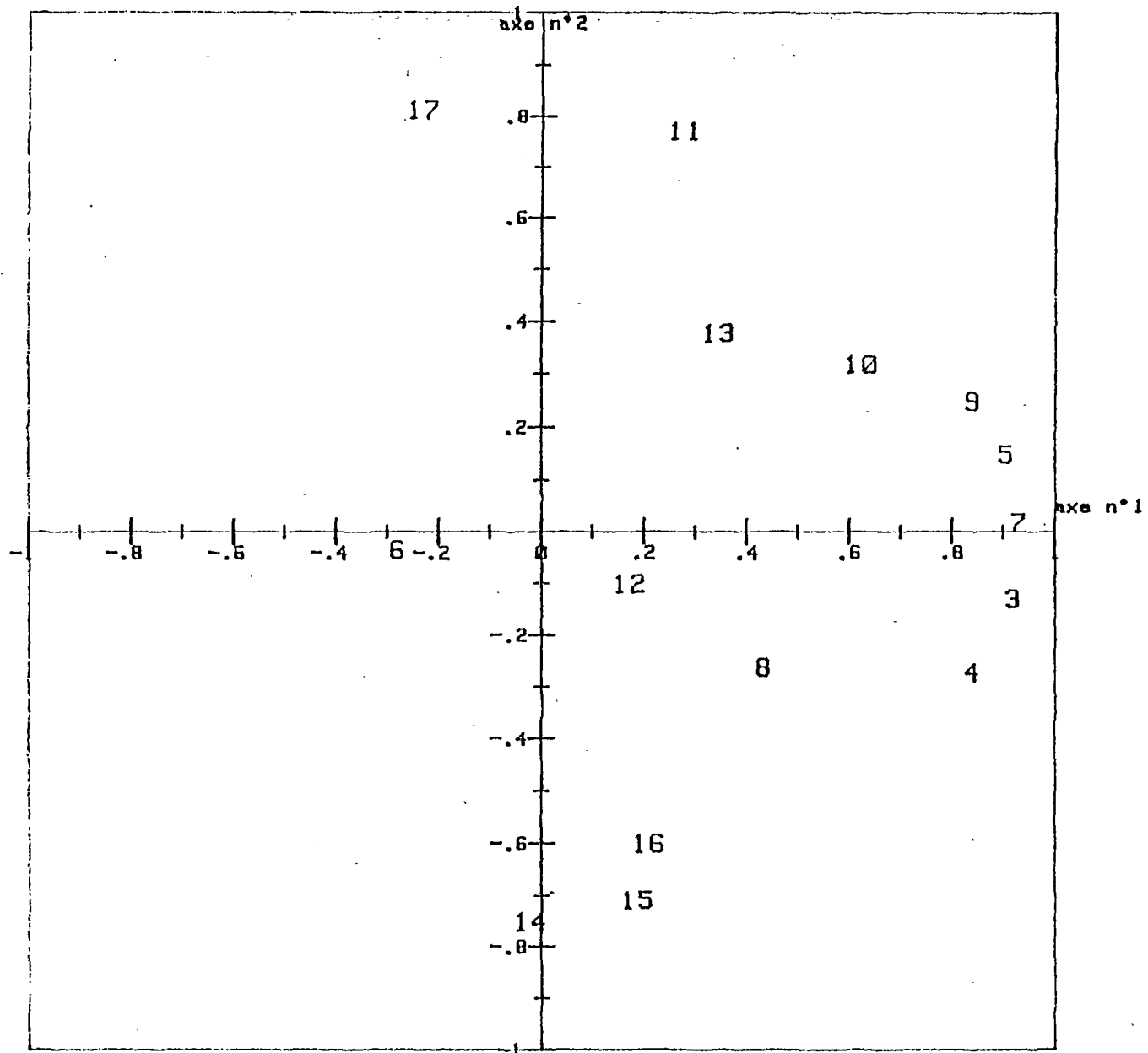


Figure 12 : BASSIN VERSANT : LES ULIS - Concentrations en DBO5
représentation des variables

ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

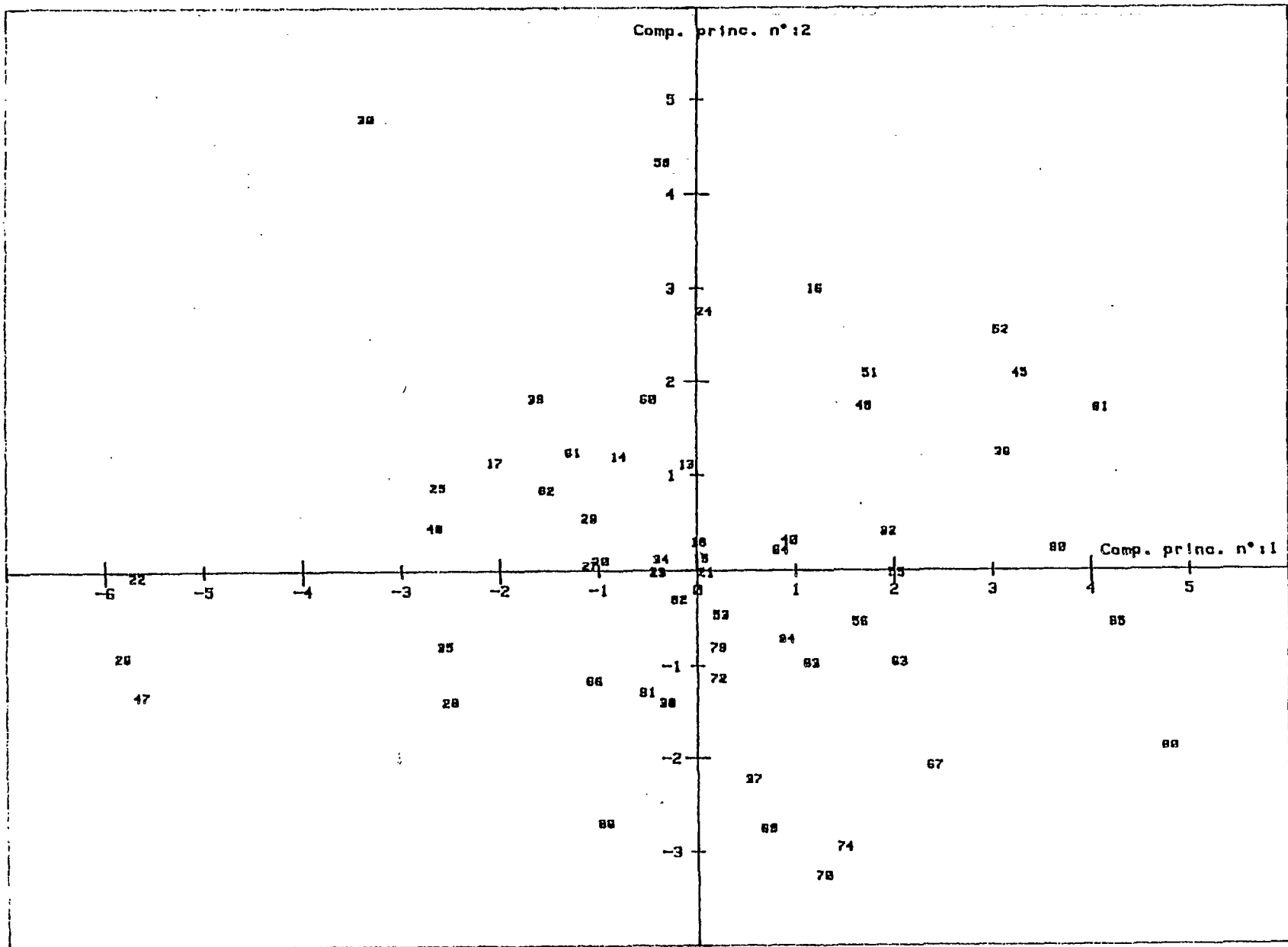


Figure 13 : BASSIN VERSANT : LES ULIS - Concentrations en DBO5

	MAUREPAS	LES ULIS	AIX-ZUP	AIX-NORD
Axe 1 (%)	38.0	33.6	33.0	33.5
Axe 2 (%)	19.0	19.0	22.6	21.4
Axe 3 (%)	12.0	14.0	16.0	14.1
Total (%)	69.0	66.6	71.6	69.0

Tableau 26 : Polluant : MES (Concentrations)
Pourcentage de variance expliquée par les trois premières composantes principales de chacun des bassins versants

	MAUREPAS	LES ULIS	AIX-ZUP	AIX-NORD
Axe 1	$\pm Q_{max}, ITC, I_{max5}$	V_r, Q_{max}	V_r, Q_{max}, HP	ITC
Axe 2	-	$\pm H7, H14, H28$	H7, H14, H28	H7, H14, H28
Axe 3	-	DP	-	-

Tableau 27 : Polluant : MES (Concentrations)
Variables caractéristiques des trois premières composantes principales pour chacun des bassins versants

	MAUREPAS	LES ULIS	AIX-ZUP	AIX-NORD
Axe 1 (%)	42.0	38.0	34,9	-
Axe 2 (%)	16,5	17,6	21,7	-
Axe 3 (%)	11,6	12,7	13,5	-
Total (%)	70,1	68,3	70,1	-

Tableau 28 : Polluant : MES (Masses)
Pourcentage de variance expliquée par les trois premières composantes principales de chacun des bassins versants

	MAUREPAS	LES ULIS	AIX-ZUP	AIX-NORD
Axe 1	$\pm V_r, HP, Q_{max}$	V_r, Q_{max}, ITC	V_r, Q_{max}, HP	-
Axe 2	$\pm H14, H28$	H7, H14, H28	H7, H14, H28	-
Axe 3	-	$\pm DP$	-	-

Tableau 29 : Polluant : MES (Masses)
Variables caractéristiques des trois premières composantes principales pour chacun des bassins versants

6.2.2. DBO5

Les résultats sont du même ordre que pour les MES et sont présentés dans les tableaux 30 à 33.

	MAUREPAS	LES ULIS	AIX-ZUP	AIX-NORD
Axe 1 (%)	36,8	33,0	29,4	33,0
Axe 2 (%)	20,1	21,0	23,5	21,8
Axe 3 (%)	11,5	13,4	14,3	11,9
Total (%)	68,4	67,4	67,2	66,7

Tableau 30 : Polluant : DBO5 (Concentrations)
Pourcentage de variance expliquée par les trois premières composantes principales de chacun des bassins versants

	MAUREPAS	LES ULIS	AIX-ZUP	AIX-NORD
Axe 1	Vr, Qmax, HP	Vr, Qmax, HP, ITC	Vr, HP, Qmax	Qmax, HP
Axe 2	-	H7, H14, H28	H7, H14, H28	H7, H14, H28
Axe 3	-	-	-	-

Tableau 31 : Polluant : DBO5 (Concentrations)
Variables caractéristiques des trois premières composantes principales pour chacun des bassins versants

	MAUREPAS	LES ULIS	AIX-ZUP	AIX-NORD
Axe 1 (%)	41,9	37,7	32,0	-
Axe 2 (%)	16,5	18,1	22,2	-
Axe 3 (%)	11,5	12,5	13,5	-
Total (%)	69,9	68,3	67,7	-

Tableau 32 : Polluant : DBO5 (Masses)
Pourcentage de variance expliquée par les trois premières composantes principales de chacun des bassins versants

	MAUREPAS	LES ULIS	AIX-ZUP	AIX-NORD
Axe 1	± Vr, Qmax, HP	Vr, Qmax	Vr, Qmax, HP	-
Axe 2	H7, H14, H28	H7, H14, H28	H7, H14, H28	-
Axe 3	-	-	-	-

Tableau 33 : Polluant : DBO5 (Masses)
Variables caractéristiques des trois premières composantes principales pour chacun des bassins versants

6.2.3. DCO

Les résultats sont du même ordre que pour les MES et sont présentés dans les tableaux 34 à 37.

	MAUREPAS	LES ULIS	AIX-ZUP	AIX-NORD
Axe 1 (%)	36,7	33,0	29,5	32,5
Axe 2 (%)	19,5	21,2	24,4	21,9
Axe 3 (%)	11,7	13,5	14,0	14,2
Total (%)	67,9	67,7	67,9	68,6

Tableau 34 : Polluant : DCO (Concentrations)
Pourcentage de variance expliquée par les trois premières composantes principales de chacun des bassins versants

	MAUREPAS	LES ULIS	AIX-ZUP	AIX-NORD
Axe 1	Vr, Qmax, HP, ITC	Vr,DR, Qmax, HP, ITC	VR, HP	HP
Axe 2	± H7, H14, H28	DTS, H7	H7, H14, H28 ± DTS	H7, H14, ± DTS, H28
Axe 3	-	-	-	-

Tableau 35 : Polluant : DCO (Concentrations)
Variables caractéristiques des trois premières composantes principales pour chacun des bassins versants

	MAUREPAS	LES ULIS	AIX-ZUP	AIX-NORD
Axe 1 (%)	42,1	37,8	33,1	-
Axe 2 (%)	16,5	18,0	22,8	-
Axe 3 (%)	11,5	12,6	13,4	-
Total (%)	70,1	68,4	69,3	-

Tableau 36 : Polluant : DCO (Masses)
Pourcentage de variance expliquée par les trois premières composantes principales de chacun des bassins versants

	MAUREPAS	LES ULIS	AIX-ZUP	AIX-NORD
Axe 1	Vr, Qmax, HP, ITC	Vr,DR, Qmax, HP, ITC	VR, HP	-
Axe 2	H7, H14, H28	H7, H14, H28	H7, H14, H28 ± DTS	-
Axe 3	-	-	-	-

Tableau 37 : Polluant : DCO (Masses)
Variables caractéristiques des trois premières composantes principales pour chacun des bassins versants

7. CONCLUSIONS

Les distributions des variables mesurées dans le cadre de la campagne de mesure nationale sur la qualité du ruissellement pluvial urbain ont été analysées d'un point de vue statistique.

Mis à part l'analyse en composantes principales, nous nous sommes appuyés sur les résultats de travaux antérieurs (DESBORDES et SERVAT (1984), SERVAT (1984), SERVAT (1985,b)) pour opérer une présélection au niveau des variables enregistrées et ne retenir que celles qui apparaissaient comme principalement liées à la pollution du ruissellement urbain.

L'analyse réalisée à l'aide de la méthode du "Stepwise" permet d'aboutir à plusieurs conclusions :

- environ 50 % de la variance de la concentration moyenne en MES peut être expliquée à l'aide de HP, lmax5 et DTS en région parisienne et de DTS à AIX-EN-PROVENCE.
- en ce qui concerne les concentrations moyennes en DBO5 et DCO, on peut expliquer jusqu'à plus de 70 % de leur variance grâce à HP et DTS, en région parisienne. Les résultats sont moins bons (au maximum 38 % de variance expliquée par DTS seulement) pour les bassins du Sud de la FRANCE.
- les masses de MES entraînées s'expliquent relativement bien à l'aide des variables Qmax, Vr et DTS, et ce quel que soit le secteur géographique il convient néanmoins de ne pas ignorer l'existence d'éventuelles corrélations fallacieuses.
- pour le paramètre DBO5, deux variables s'imposent pour les masses en région parisienne : Vr et DTS. Sur le bassin d'AIX-ZUP, par contre, on retrouve DTS, mais associé à lmax5 qui est une mesure de l'agressivité de la pluie. Les pourcentages de variance expliquée vont de 72 % (LES ULIS) à 84 % (MAUREPAS).

- dans le cas des masses de DCO les équations retenues sont identiques en région parisienne et font apparaître V_r , Q_{max} et DTS avec des pourcentages de variance expliquée de 71 % à MAUREPAS et 75 % aux ULIS. Pour AIX-ZUP seule la variable I_{max5} est retenue mais avec un coefficient de détermination élevé puisqu'il est de 85 %.

Il apparaît donc, à première vue, que dans le cas des équations de régression multiple, retenues par la méthode du "Stepwise" et pour les valeurs naturelles, le poids des variables explicatives n'est pas le même selon les conditions climatiques différentes qui règnent sur les bassins versants étudiés.

L'analyse en composantes principales permet d'expliquer environ 70 % de la variance simultanée des variables caractéristiques d'un "événement pollution". S'il se révèle pratiquement impossible de définir de manière précise la troisième composante principale, on a vu par contre que la première est caractérisée par des paramètres pluviométriques ou débitométriques propres à l'événement quand la seconde est représentative de facteurs climatiques propres à la période qui précède l'événement. L'individualisation de ces deux grands groupes de variables constitue le résultat majeur de cette ACP.

Plusieurs enseignements peuvent donc être tirés de l'exploitation des données telle que nous l'avons réalisée :

- 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 calculées sur les logarithmes des variables explicatives 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 :

- la génération de valeurs négatives,
- la présence d'une ordonnée à l'origine.

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

$$Y = c X_1^a X_2^b \quad (3.12)$$

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

$$\text{Masse de polluant transportée} = K I_{max5}^a V_r^b DTS^c \quad (3.13)$$

Dans cette équation, I_{max5} représente la capacité de la pluie à arracher la pollution de la surface du bassin et V_r l'élément moteur du processus d'entraînement, alors que DTS caractérise la phase d'accumulation.

L'ensemble de ces résultats et de ces conclusions a servi de base à l'approche modélisatrice développée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 4

APPROCHE MODELISATRICE

1. DEFINITION DES OBJECTIFS

Les besoins des utilisateurs mais aussi, et surtout, la nature des données disponibles influent sur le type de modèle que l'on est en mesure de proposer.

S'agissant de la pollution du ruissellement pluvial urbain, on pourrait ainsi définir plusieurs objectifs. On peut imaginer un modèle de calcul des charges polluantes entraînées au cours d'un événement pluvieux sur des pas de temps assez courts (15 mn par exemple). Dans ce cas, la modélisation serait une aide efficace pour les gestionnaires, leur permettant un contrôle en temps réel du réseau et des rejets dans le milieu récepteur. Une représentation du phénomène sur des pas de temps plus importants permettrait de prendre des décisions au sujet d'un traitement éventuel des eaux après stockage dans des bassins de retenue. On peut également concevoir un modèle calculant la charge polluante véhiculée globalement au cours d'un événement et permettant d'approcher la valeur de la masse transportée et rejetée dans le milieu naturel sur une longue durée. Une telle démarche serait alors une aide à la décision lorsqu'il s'agit de procéder à des choix de traitement des eaux de pluie.

La nature et la précision des données disponibles vont imposer les limites du modèle que nous proposerons plus loin. Dans le cadre de la campagne sur les B.V. expérimentaux les mesures ont été effectuées à l'exutoire des bassins versants. Elles sont constituées d'un certain nombre de prélèvements réalisés au cours d'un événement pluvieux. L'échantillonnage est alors le témoin global d'un phénomène spatialement distribué qu'il caractérise par une valeur de concentration moyenne en ME5, en DCO ou en DBO5. Le nombre d'événements pris en compte de cette façon est élevé sur chacun des quatre bassins sélectionnés, ce qui n'est pas le cas des pollutogrammes.

La généralisation des relations obtenues paraît difficile en raison du nombre réduit de B.V. sur lequel a porté la campagne de mesure. L'importance d'un facteur climatique pourra cependant

être mise en évidence vu le choix des bassins versants (deux en région parisienne et deux dans le Sud de la FRANCE).

L'approche modélisatrice des phénomènes, que nous proposerons ici, reste donc très perfectible. Elle découle du plan d'expérience retenu par les sous-groupes de travail qui ont conçu et réalisé cette campagne de mesure nationale : évaluation des masses transportées sur une échelle de temps de longue durée (ici environ une année) et pour une "échelle d'espace" qui ait la taille d'une petite unité (bassin versant de superficie < 50 ha).

Pour chacun des paramètres majeurs de pollution (MES, DBO5, DCO) nous avons donc cherché à établir un modèle permettant de reproduire, en premier lieu, les masses entraînées et rejetées au cours d'une longue période (une année) et, en second lieu, les masses véhiculées globalement à l'échelle d'un événement.

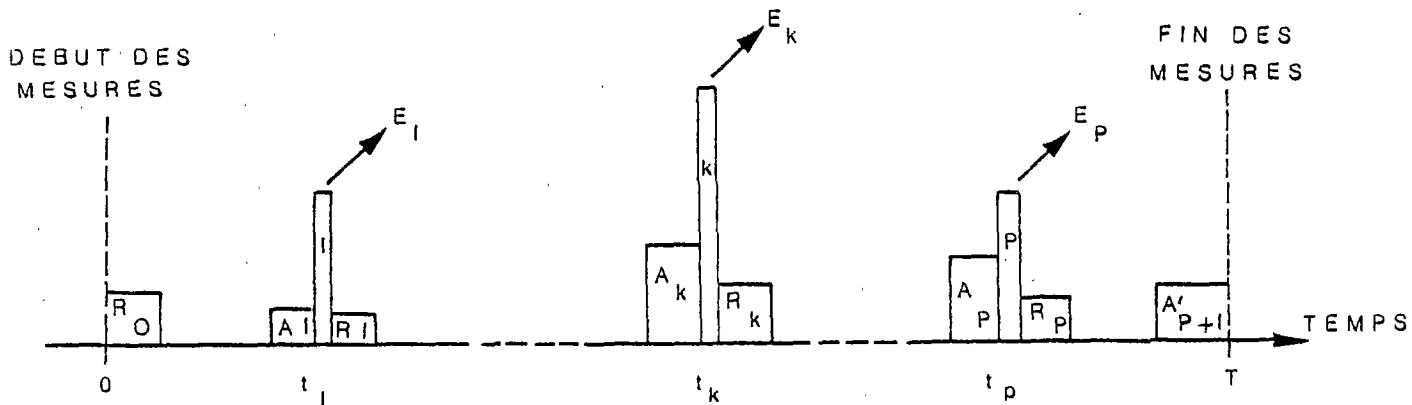
La modélisation strictement empirique, c'est-à-dire, la détermination d'équations de régressions simples ou multiples, linéaires ou non, ne nous paraît pas satisfaisante. Elle fait, en effet, intervenir des variables différentes d'un bassin à l'autre, ce qui va à l'encontre d'une généralisation. Qui plus est on a affaire non pas à un phénomène reproductible mais à des événements. Dans ce cas, certains d'entre eux à faible probabilité d'occurrence mais présentant des valeurs élevées influenceraient trop les relations établies.

Une modélisation s'appuyant sur la théorie des systèmes aurait pu convenir puisque les mesures réalisées sont le témoin d'un processus de transformation spatialement distribué. Si l'identification du signal de sortie du système, que représentent la surface du B.V. et le réseau d'assainissement, est simple car consistant en l'évolution des concentrations en polluants au point de mesure, il n'en va pas de même pour l'entrée. C'est, en effet, une combinaison à l'échelle du bassin versant de la masse accumulée, des caractéristiques pluviométriques et du ruissellement de surface. L'entrée du système reste, à l'heure actuelle, difficilement identifiable.

La démarche finalement retenue est du type conceptuel. Elle s'appuie sur les résultats exposés précédemment : représentativité des mesures et tendances dégagées par l'analyse des données. Nous présenterons ici deux types de modèles d'entraînement. L'un d'eux, faisant intervenir la masse de pollution disponible à la surface du bassin versant, nous a conduit à élaborer un modèle permettant d'évaluer la production de polluant à l'échelle des bassins versants à un pas de temps journalier.

2. APPROCHE CONCEPTUELLE

Dans le cadre de cette modélisation, nous nous sommes appuyés sur le schéma proposé par DESBORDES et al. (1980), à savoir :



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 .

On peut également définir Md_i , la masse disponible à l'entraînement au cours de l'événement i , par :

$$Md_i = A_i + R_{(i-1)}. \quad (4.1)$$

Divers concepts, qui sont en fait des hypothèses très plausibles, commandent l'établissement de modèles d'accumulation et d'entraînement.

En ce qui concerne l'accumulation, nous avons supposé que la production journalière de polluants était constante à l'échelle du bassin versant et que la conservation de la masse était vérifiée. C'est-à-dire, que sur une longue durée (environ une année) la masse de pollution produite est égale à la masse entraînée, en moyenne. Dans ce cas, après une longue période d'observation, le "stock" initial (R_0 sur le schéma précédent) a une valeur assez voisine du "stock" final (R_n), ce que l'on traduira par $R_0 \approx R_n$.

L'entraînement de la pollution a été représenté à l'aide de deux modèles reposant sur des concepts différents. Dans un premier cas, on a considéré que la masse disponible calculée à partir du modèle d'accumulation était un facteur limitant. Dans un second cas, on a envisagé un "stock" de pollution à deux niveaux : un premier niveau, fréquemment sollicité, et un second niveau, que nous appellerons "niveau profond", parfois sollicité et qui ne constitue pas un facteur limitant.

La masse disponible (Md) est représentative de la durée de temps sec dans la mesure où, comme on le verra plus loin, sa valeur est proportionnelle à DTS.

Outre cette masse disponible qui n'intervient que dans le premier modèle, les variables retenues sont les mêmes dans les deux cas et découlent de l'analyse 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).

Nous ne présenterons ici que les formulations retenues au bout du compte renvoyant à d'autres publications pour le détail des différents essais réalisés (SERVAT (1984), SERVAT (1985,b)).

3. MODELE D'ACCUMULATION LINEAIRE (SERVAT (1985,c), SERVAT (1986)).

Ce modèle d'accumulation repose sur les hypothèses énoncées précédemment :

- taux de production constant sur le pas de temps considéré,
- "stock" initial peu différent du "stock" final sur une longue durée ($R_0 \approx R_n$),
- masse entraînée au cours d'un événement inférieure ou égale à la masse disponible.

Dans ce cas, la masse accumulée est directement proportionnelle à la durée de temps sec :

$$A_i = Pr \cdot DTS_i \quad (4.2)$$

avec :

A_i = masse de pollution accumulée à la surface du B.V. au cours de la période de temps sec DTS_i .

Pr = production de polluants (MES, DBO5 ou DCO) sur un pas de temps.

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

$$\begin{array}{cccc}
 R_0 + A_1 & = & E_1 + R_1 \\
 R_1 + A_2 & = & E_2 + R_2 \\
 R_2 + A_3 & = & E_3 + R_3 \\
 \vdots & & \vdots & \vdots \\
 R_{k-1} + A_k & = & E_k + R_k \\
 \vdots & & \vdots & \vdots \\
 R_{n-1} + A_n & = & E_n + R_n
 \end{array} \quad (4.3)$$

D'où en sommant :

$$R_o + \sum_{i=1}^n A_i = \sum_{i=1}^n E_i + R_n \quad (4.4)$$

avec :

R_o = "stock" de pollution initial.

R_n = "stock" de pollution final.

A_i = masse de pollution accumulée au cours de la période de temps Δt séparant les événements i et $i-1$

E_i = masse de pollution entraînée au cours de l'événement i .

R_i = masse de pollution restant à la surface du bassin versant après l'événement i .

A partir de l'hypothèse $R_o \neq R_n$, on peut calculer une valeur de la production journalière, en MES, DBO5 ou DCO puisque :

$$\sum_{i=1}^n A_i = Pr \sum_{i=1}^n DTS_i \quad (4.5)$$

DTS_i étant exprimé en nombre de pas de temps.

Soit en reprenant l'équation précédente :

$$R_o + Pr \sum_{i=1}^n DTS_i = \sum_{i=1}^n E_i + R_n \quad (4.6)$$

et

$$Pr = \frac{\sum_{i=1}^n E_i + (R_n - R_o)}{\sum_{i=1}^n DTS_i} \quad (4.7)$$

Si, sur une longue durée, $R_0 \neq R_n$, alors :

$$Pr = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{\sum_{i=1}^n DTS_i} \quad (4.8)$$

Une fois Pr déterminé, nous avons vérifié que la contrainte $E_i \leq R_{(i-1)} + A_i$ était satisfaite pour chaque événement. Dans ce but, sur chacun des B.V., on a retenu un événement pour lequel on peut considérer que l'on a approché un "lessivage" complet de la surface.

Pour cet événement, on peut alors écrire : $E_i = R_{(i-1)} + A_i$, déterminer une valeur de $R_{(i-1)}$ minimale et, de proche en proche, R_0 et R_n à une constante près. De même, l'historique des masses résiduelles à la surface des B.V. peut être déterminée (nous en donnons des exemples en figures 14 et 15, pour le bassin de MAUREPAS).

Le tableau 38 présente les valeurs de production journalière en MES, DBO5 et DCO auxquelles nous sommes arrivés (rappelons qu'il n'a pas été possible de travailler en terme de masses sur le bassin d'AIX-Nord).

Dans le cadre des hypothèses formulées précédemment, ces valeurs sont comparables aux charges spécifiques annuelles du tableau 39. (Les valeurs entre parenthèses correspondent à une production journalière calculée à partir de la charge annuelle).

Les différents résultats sont en conformité avec les hypothèses de départ et confortent notre choix même si, conceptuellement, un modèle d'accumulation linéaire n'apparaît pas entièrement satisfaisant. C'est vrai, en particulier, dans le cas de la DBO5 puisqu'on ne peut, dans ces conditions, prendre en compte un éventuel processus de biodégradation. Il est probable que la relative imprécision des mesures ne nous permette pas d'appréhender ce phénomène.

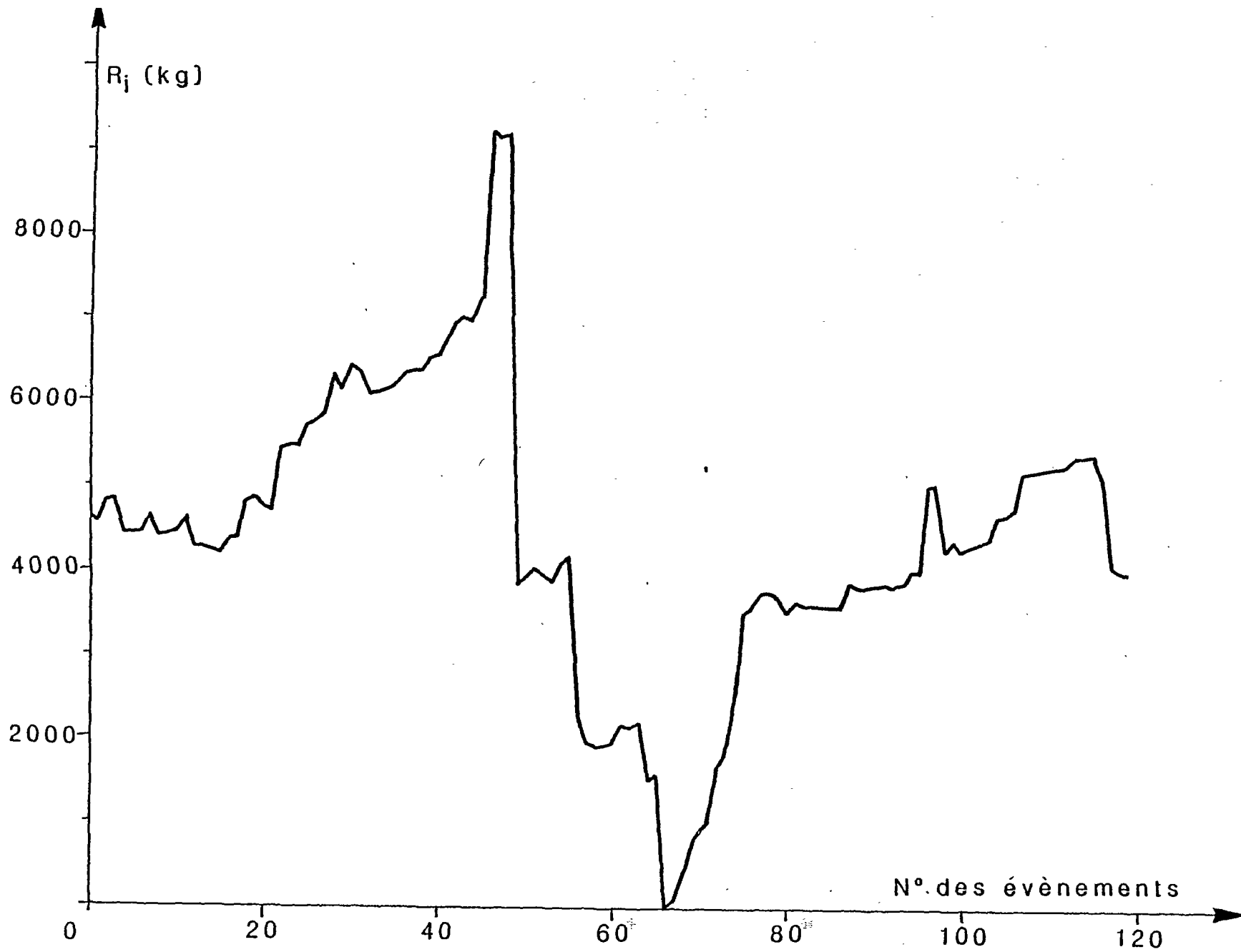


Figure 14 : MES - BASSIN VERSANT : MAUREPAS - R_i : Masses résiduelles à la surface du bassin versant après chaque événement pluvieux

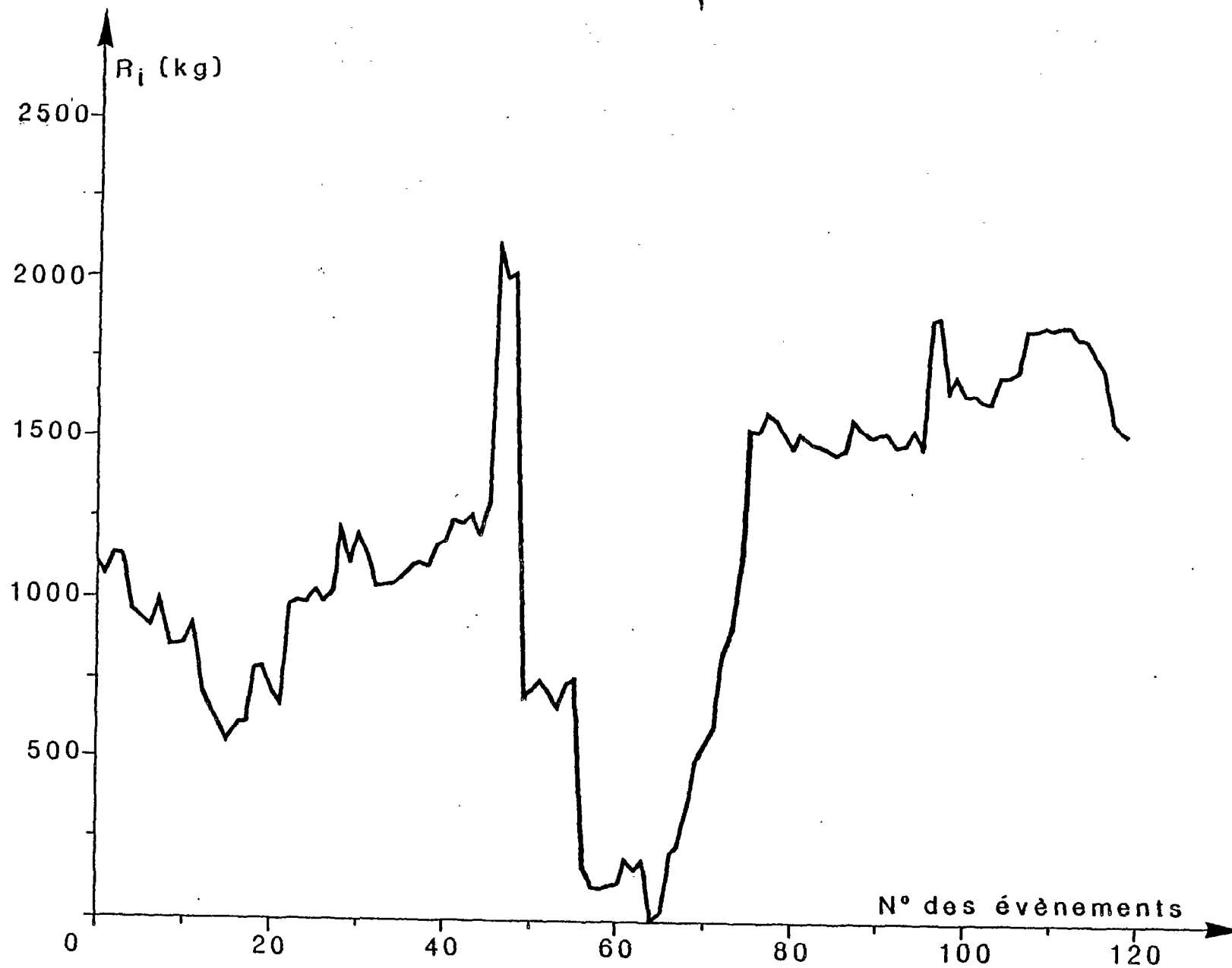


Figure 15 : DCO - BASSIN VERSANT : MAUREPAS - R_i ; Masses résiduelles à la surface du bassin versant après chaque événement pluvieux

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

Tableau 38 : Productions journalières calculées en MES, DBO5 et DCO (kg/j/ha)

Site ou étude	MES	DBO5	DCO
Cincinatti (A)	818 (2.25)	37 (0.10)	269 (.74)
Velizy (B)	400 (1.10)	36 (0.10)	190 (.52)
Nice (B)	540 (1.50)		530 (1.45)
BV Canadien 60 hab/ha (C)	392 (1.07)	34 (0.09)	
BV Canadien 150 hab/ha (C)	560 (1.53)	90 (0.25)	
7 BV Finlandais (C)	100 à 1000 (.27 à 2.75)	10 à 100 (0.03 à 0.27)	
Synthèse Biblio. (A)		75 (0.21)	

(A) : (RIBSTEIN et DESBORDES (1978))

(B) : (HEMAIN (1980))

(C) : (O.C.D.E. (1982))

Tableau 39 : Charges annuelles spécifiques en kg/an/ha et productions journalières correspondantes (valeurs entre ()) en kg/j/ha. D'après HEMAIN (1983)

4. MODELES D'ENTRAINEMENT (SERVAT (1985,c), SERVAT (1986))

Comme nous l'avons dit plus haut, deux types de modèles d'entraînement ont été élaborés, se référant à deux concepts différents : le premier fait intervenir une notion de masse disponible (calculée à l'aide du modèle d'accumulation linéaire), le second envisage un stock de pollution à deux niveaux et ne constituant en aucun cas un facteur limitant.

La méthode d'optimisation utilisée ici est celle développée par ROSENBROCK (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, 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. C'est la condition sine qua non de l'éventuelle généralisation de tels modèles.

4.1. Modèle d'entraînement fonction de la masse disponible

La formulation retenue est du type :

$$E = K M_d^\alpha I_{max5}^\beta V_r^\gamma \quad (4.9)$$

avec :

E = masse transportée au cours d'un événement (kg).

M_d = masse disponible (kg).

I_{max5} = intensité maximale moyenne sur 5 minutes (mm/h).

V_r = volume ruisselé au cours de l'événement (m³)

K , α , β et γ sont des paramètres propres à chaque bassin versant.

Les valeurs déterminées pour chacun des paramètres ont été reportées dans les tableaux 40 à 42.

La fonction critère utilisée est exprimée sous la forme :

$$F = \frac{\sum (E_{obs} - E_{calc})^2}{N \cdot 1000} \quad (4.10)$$

avec :

E_{obs} = masse entraînée observée.

E_{calc} = masse entraînée calculée.

N = nombre d'événements sur lesquels a porté le calage des paramètres et correspondant à environ 50 % de la masse totale observée.

Les tableaux 43 à 45 présentent les résultats obtenus. Ceux-ci sont illustrés par les tracés de double cumul "masses observées-masses calculées" des figures 16 et 17. Ces tracés ne concernent que les bassins versants des ULIS et d'AIX-ZUP, les résultats pour MAUREPAS étant assez peu satisfaisants.

Les simulations pour les paramètres DCO et DBO5 sont moins bonnes que pour les MES. Il est difficile de fournir une véritable explication aux écarts importants relevés sur le bassin de MAUREPAS. Ceci mis à part, la reproduction de la masse totale entraînée observée est assez précise ce qui correspond à la réalisation de notre premier objectif. Concernant les événements proprement dits, on atteint une précision de $\pm 10\%$ à $\pm 30\%$ pour les plus importants d'entre eux. C'est un résultat intéressant en soi dans la mesure où ils correspondent à la majeure partie de la pollution transportée.

	MAUREPAS	LES ULIS	AIX-ZUP
K	0.412	0.104	0.117
α	0.165	0.420	0.359
β	0.921	0.714	0.991
γ	0.382	0.456	0.369

Tableau 40 : MES - Valeurs des différents paramètres
Modèle : $E = K M d^\alpha I_{max} 5^\beta V r^\gamma$

	MAUREPAS	LES ULIS	AIX-ZUP
K	0,361	0.198	0.041
α	0.223	0.181	0.002
β	0.500	0.174	0.799
γ	0.291	0.566	0.683

Tableau 41 : DBO5 - Valeurs des différents paramètres
Modèle : $E = K M d^\alpha I_{max} 5^\beta V r^\gamma$

	MAUREPAS	LES ULIS	AIX-ZUP
K	0.122	0.343	0.303
α	0.630	0.259	0.224
β	0.807	0.345	0.592
γ	0.142	0.550	0.527

Tableau 42 : DCO - Valeurs des différents paramètres
Modèle : $E = K M d^\alpha I_{max} 5^\beta V r^\gamma$

	MAUREPAS	LES ULIS	AIX-ZUP
Masse moyenne entraînée (kg)	227.9	426.1	274.7
Fonction critère	20.41	92.76	30.03
Ecart entre masses totales observées et calculées (%)	13	5.3	6.2

Tableau 43 : MES - Résultats obtenus sur les 3 B.V.
avec $E = K M d^{\alpha} l_{max} 5^{\beta} V r \gamma$

	MAUREPAS	LES ULIS	AIX-ZUP
Masse moyenne entraînée (kg)	13.0	39.7	49.3
Fonction critère	0.15	0.54	0.85
Ecart entre masses totales observées et calculées (%)	57,6	2.3	-6.9

Tableau 44 : DBO5 - Résultats obtenus sur les 3 bassins versants
avec $E = K M d^{\alpha} l_{max} 5^{\beta} V r \gamma$

	MAUREPAS	LES ULIS	AIX-ZUP
Masse moyenne entraînée (kg)	85.5	200.9	206.5
Fonction critère	4.70	12.11	18.40
Ecart entre masses totales observées et calculées (%)	7.4	5.7	1.5

Tableau 45 : DCO - Résultats obtenus sur les 3 bassins versants
avec $E = K M d^{\alpha} l_{max} 5^{\beta} V r \gamma$

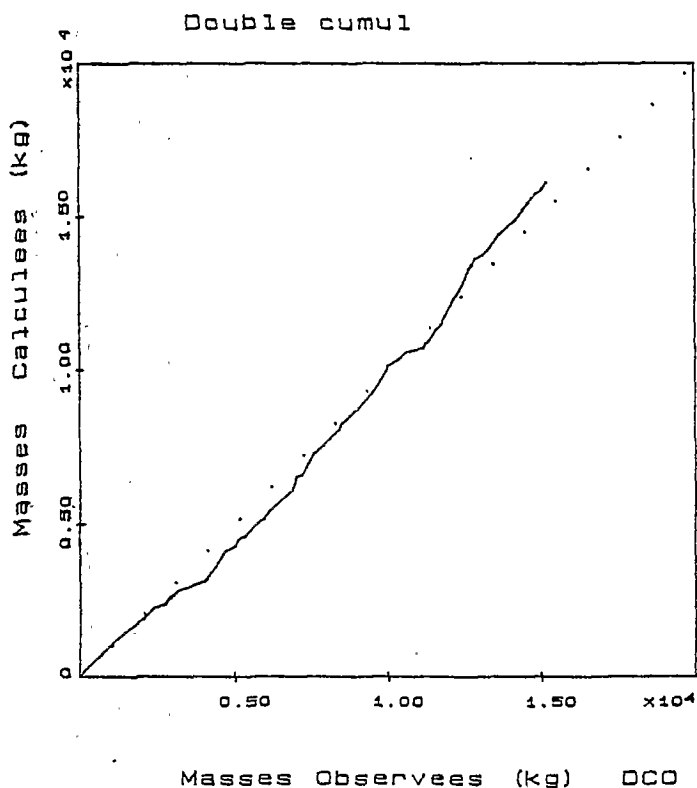
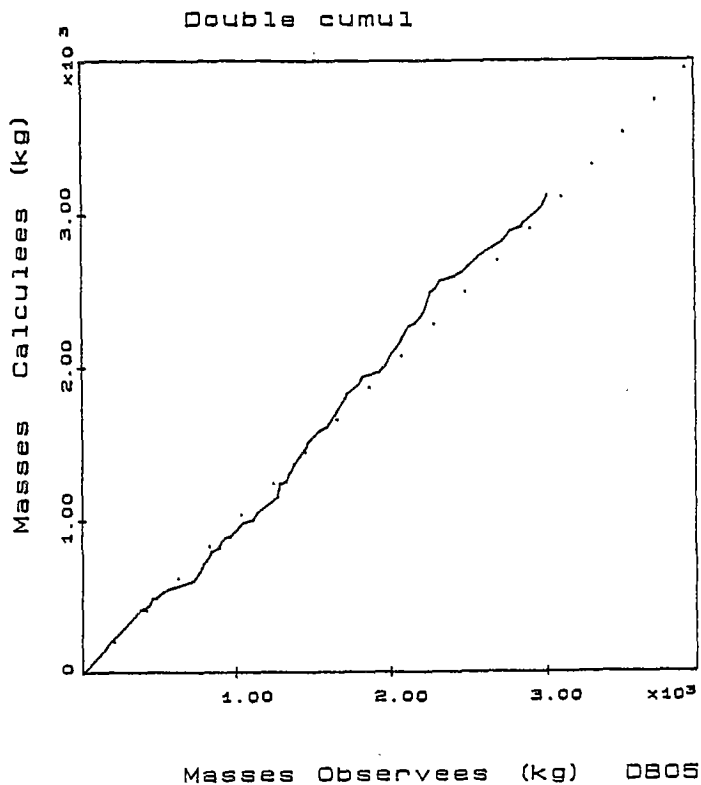
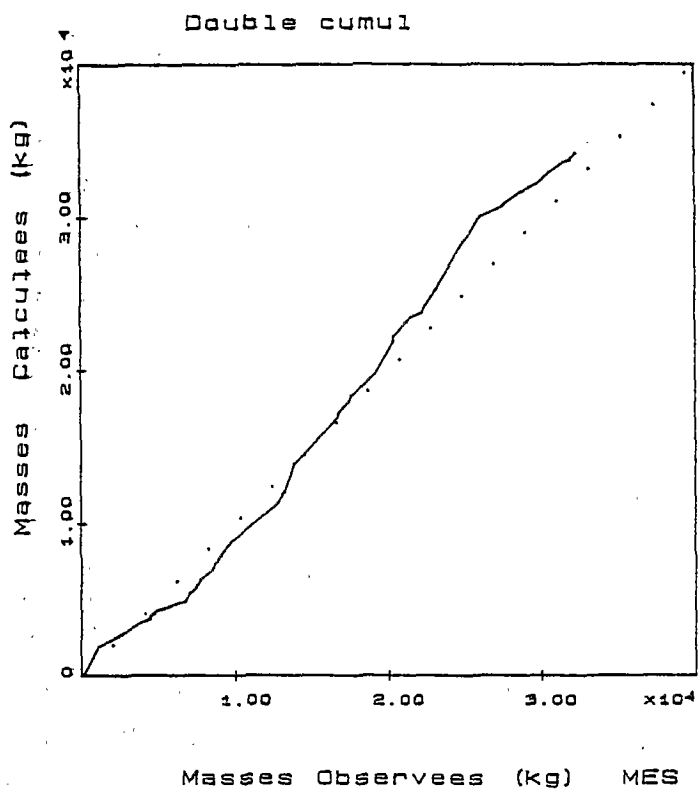


Figure : 16 - $E-K, Md^{\alpha} I_{max} S^{\beta} V_r^{\gamma}$

Bassin versant:

Les Ulis

Double cumul : masses calculées - masses observées
(sur la totalité de la période d'enregistrement)

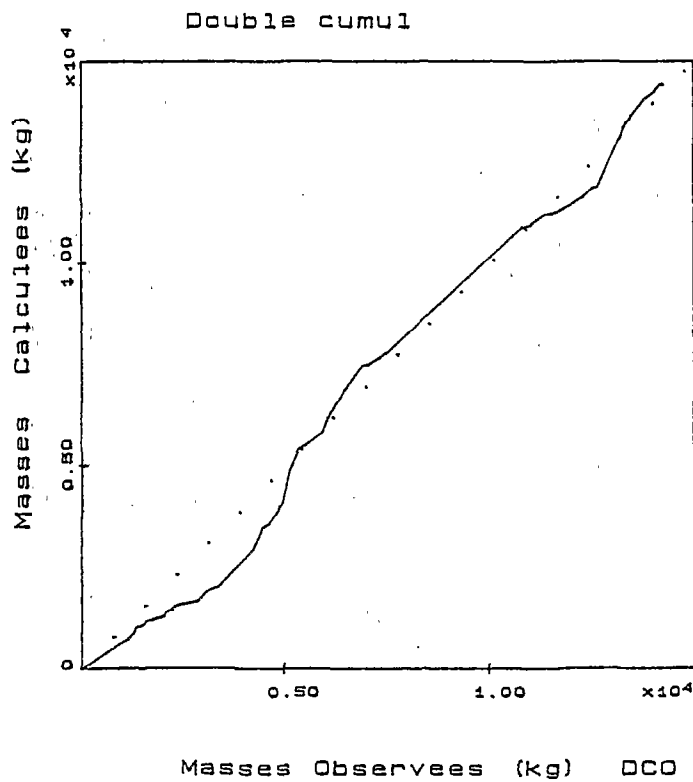
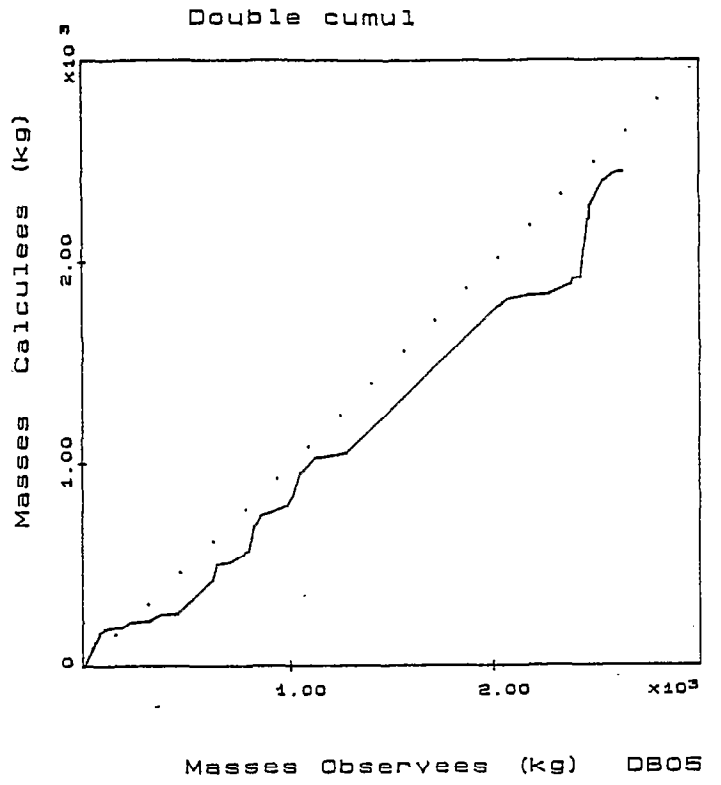
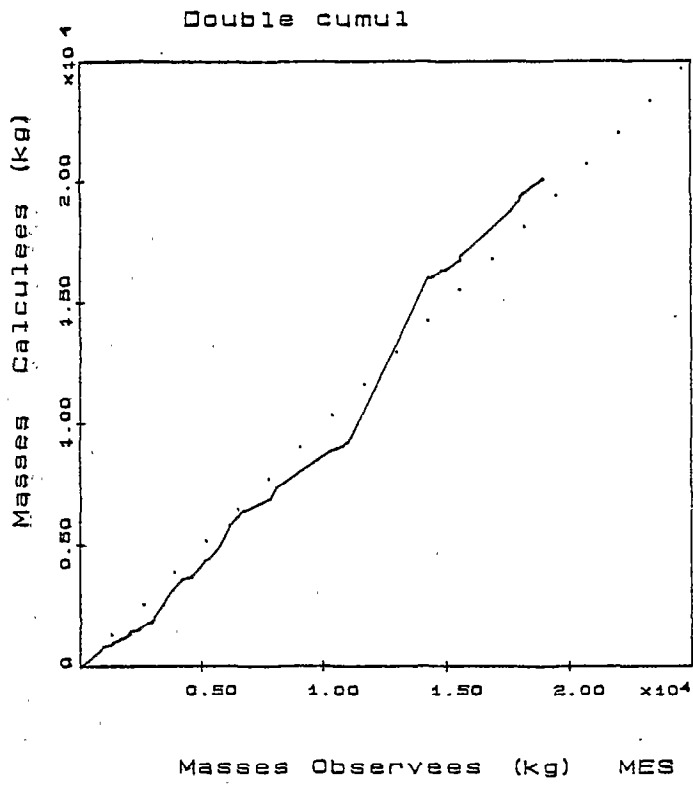


Figure : 17 - $E-K M d^{\alpha} I_{max} S^{\beta} V r^{\gamma}$

Bassin versant: Aix-ZUP

Double cumul : masses calculées - masses observées
(sur la totalité de la période d'enregistrement)

Nous nous sommes ensuite 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 trois paramètres restants. 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 pourrions simuler avec succès.

Cette étude réalisée pour les trois polluants et pour les bassins versants des ULIS et d'AIX-ZUP a montré que les paramètres K et α n'étaient pas sensibles du tout. En ce qui concerne α c'est la valeur de M_d , calculée à partir d'hypothèses simplificatrices, qui pourrait être mise en cause. β et γ 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.

Tous ces résultats sont synthétisés dans le tableau 46 et sont illustrés par plusieurs tracés. Ceux-ci correspondent aux simulations (représentées sous forme de double cumulés) réalisées avec un paramètre fixé et après optimisation sur les trois restants. Ces graphes montrent que, pour les paramètres sensibles, dès que l'on s'écarte de la zone de variation autorisée les résultats sont rapidement mauvais (écart entre les masses totales observées et calculées supérieur à 10 %). Les figures 18 et 19 sont données à titre d'exemple (LES ULIS-MES et AIX-ZUP-DCO) les autres tracés se trouvant en annexe.

	MES		DBO5		DCO	
	LES ULIS	AIX ZUP	LES ULIS	AIX ZUP	LES ULIS	AIX ZUP
K	-	-	-	-	-	0.2-0.9
α	-	-	-	-	-	-
β	0.7-1.0	<1.2	0.06-0.3	0.6-1.05	0.2-0.6	0.3-0.8
γ	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 46 : Intervalles de variation des paramètres, définis dans chacun des cas, après étude de sensibilité.

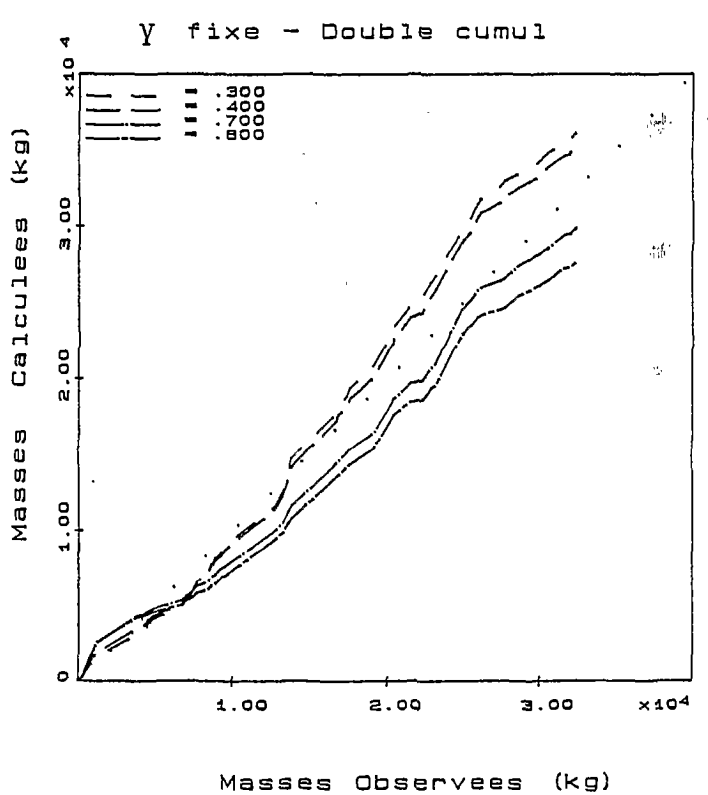
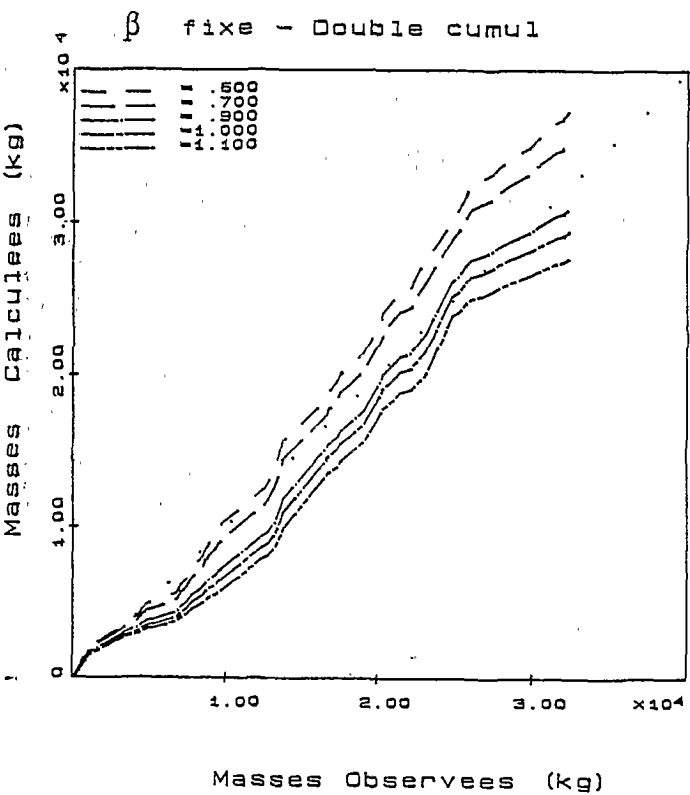
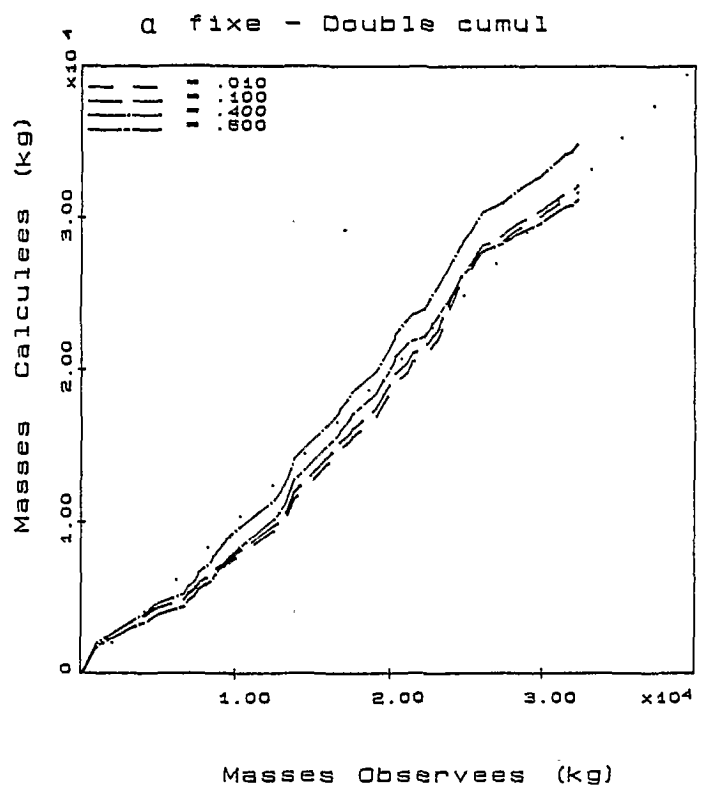
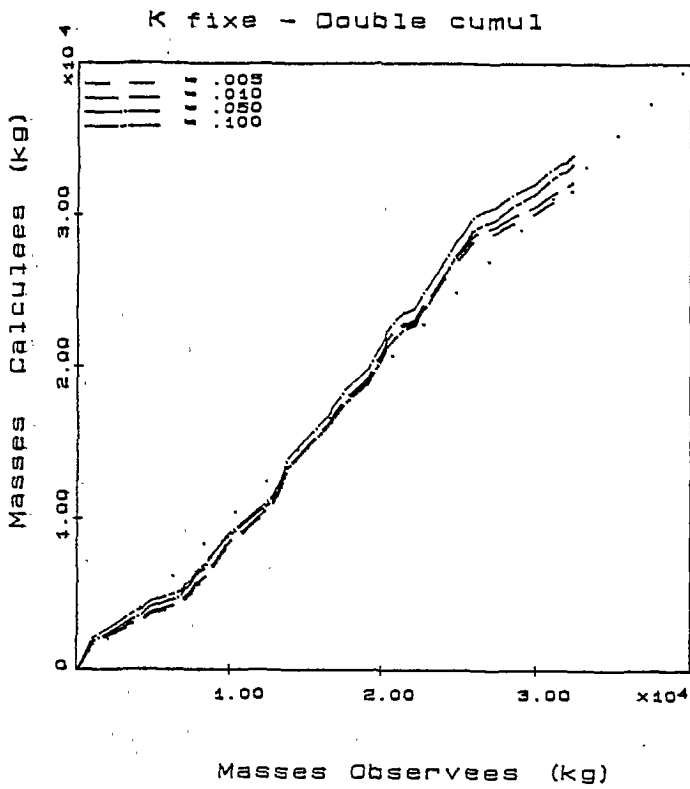


Figure : 18 - $E = K M d^a I_{max} 5^\beta V r^\gamma$

Polluant : MES B.V. : Les Ulis

Etude de sensibilite des differents parametres

Double cumul : masses calculees - masses observees
(sur la totalite de la periode d'enregistrement)

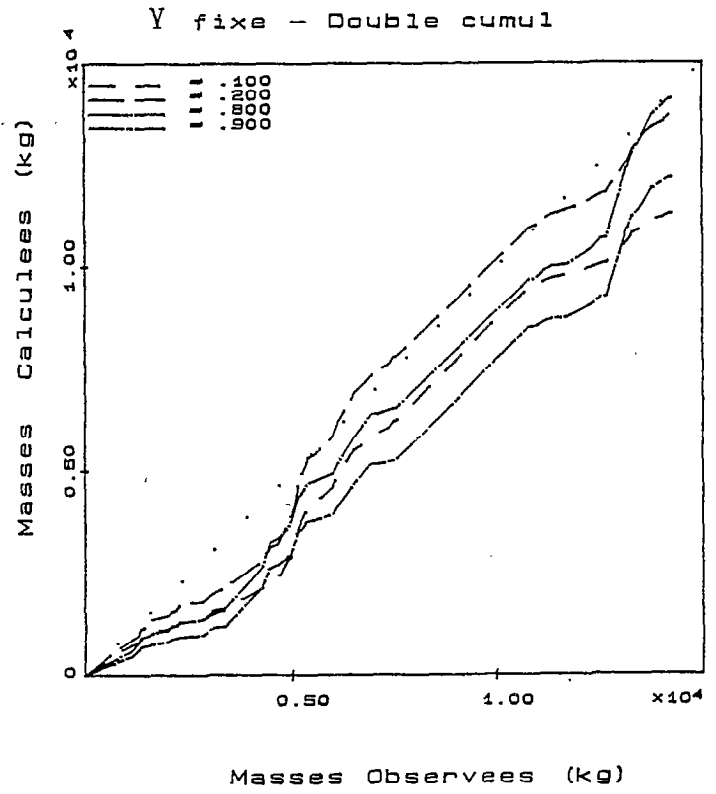
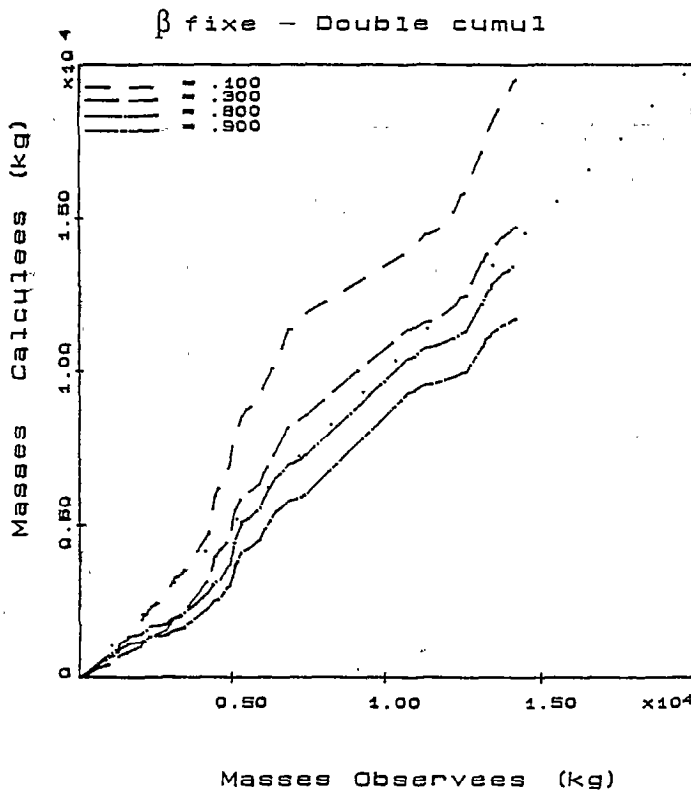
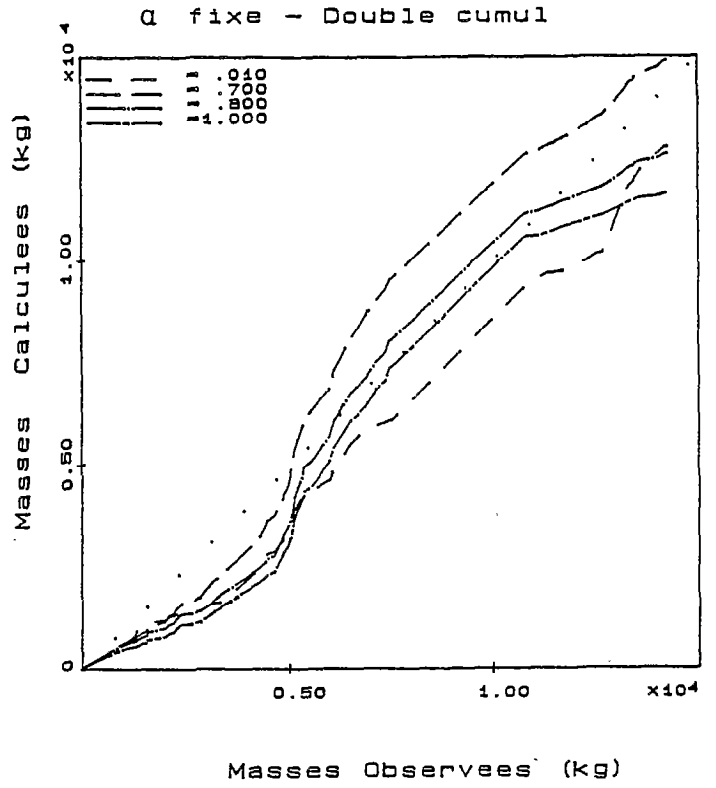
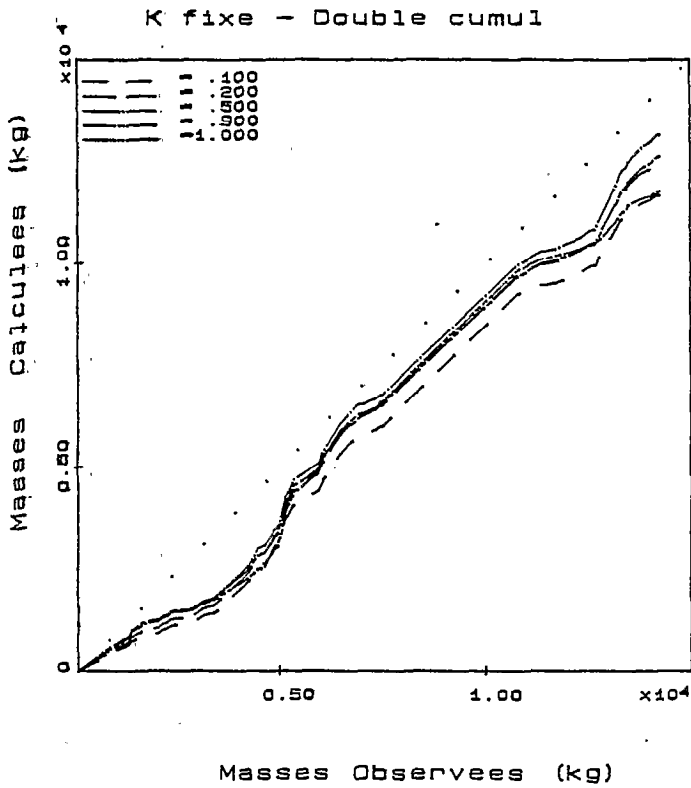


Figure : 19 - $E = K M d^{\alpha} I_{max}^{\beta} V r^{\gamma}$

Polluant : DCO

B.V. : Aix-ZUP

Etude de sensibilite des differents parametres

Double cumul : masses calculees - masses observees

(sur la totalite de la periode d'enregistrement)

4.2. Modèle d'entraînement sans facteur limitant

Dans ce cas, la formulation retenue est du type :

$$E = K' I_{max5}^{\beta'} V_r^{\gamma'} \quad (4.11)$$

avec :

E , I_{max5} et V_r définis comme précédemment.

K' , β' et γ' sont des paramètres propres à chaque bassin versant.

Les valeurs déterminées pour chacun des paramètres ont été reportées dans les tableaux 47 à 49.

La fonction critère utilisée ici est la même que précédemment.

Les tableaux 50 à 52 présentent les résultats obtenus. Ceux-ci sont illustrés par les tracés de double cumul "masses observées-masses calculées" des figures 20 et 21. Ces tracés ne concernent, là aussi, que les bassins versants des ULIS et d'AIX-ZUP.

L'examen des tableaux et des graphes montre que les résultats sont équivalents à ceux obtenus avec le modèle précédent. La précision sur les masses totales reste de l'ordre de 5 à 10 %. Les événements les plus importants en terme de masse transportée sont reproduits à $\pm 10\%$ à 30% près.

Nous avons également procédé à une analyse de sensibilité du modèle en suivant la procédure décrite plus haut. Cette étude a montré que les trois paramètres du modèle étaient assez sensibles. C'est un point positif plaidant 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 53.

	MAUREPAS	LES ULIS	AIX-ZUP
K'	0.372	1.999	2.522
β'	0.399	0.954	0.920
γ'	0.855	0.456	0.373

Tableau 47 : MES - Valeurs des différents paramètres
Modèle : $E = K' I_{max} 5\beta' V\gamma'$

	MAUREPAS	LES ULIS	AIX-ZUP
K'	0.158	1.002	0.100
β'	0.462	0.218	0.916
γ'	0.534	0.483	0.515

Tableau 48 : DBO5 - Valeurs des différents paramètres
Modèle : $E = K' I_{max} 5\beta' V\gamma'$

	MAUREPAS	LES ULIS	AIX-ZUP
K'	0.745	1.182	1.011
β'	0.739	0.390	0.804
γ'	0.487	0.640	0.483

Tableau 49 : DCO - Valeurs des différents paramètres
Modèle : $E = K' I_{max} 5\beta' V\gamma'$

	MAUREPAS	LES ULIS	AIX-ZUP
Masse moyenne entraînée (kg)	227.9	426.1	274.7
Fonction critère	24.81	108.22	29.31
Ecart entre masses totales observées et calculées (%)	68.2	0.5	9.6

Tableau 50 : MES - Résultats obtenus sur les 3 bassins versants avec $E = K \text{ I}_{\text{max}} 5^{\beta} \text{ V}_{\text{ry}}$

	MAUREPAS	LES ULIS	AIX-ZUP
Masse moyenne entraînée (kg)	13.0	39.7	49.3
Fonction critère	0.10	0.53	0.86
Ecart entre masses totales observées et calculées (%)	25.1	-0.1	-9.4

Tableau 51 : DBO5 - Résultats obtenus sur les 3 bassins versants avec $E = K' \text{ I}_{\text{max}} 5^{\beta} \text{ V}_{\text{ry}}$

	MAUREPAS	LES ULIS	AIX-ZUP
Masse moyenne entraînée (kg)	185.5	200.9	206.5
Fonction critère	3.95	11.79	15.29
Ecart entre masses totales observées et calculées (%)	36	8.6	-8.1

Tableau 52 : DCO - Résultats obtenus sur les 3 bassins versants avec $E = K' \text{ I}_{\text{max}} 5^{\beta} \text{ V}_{\text{ry}}$

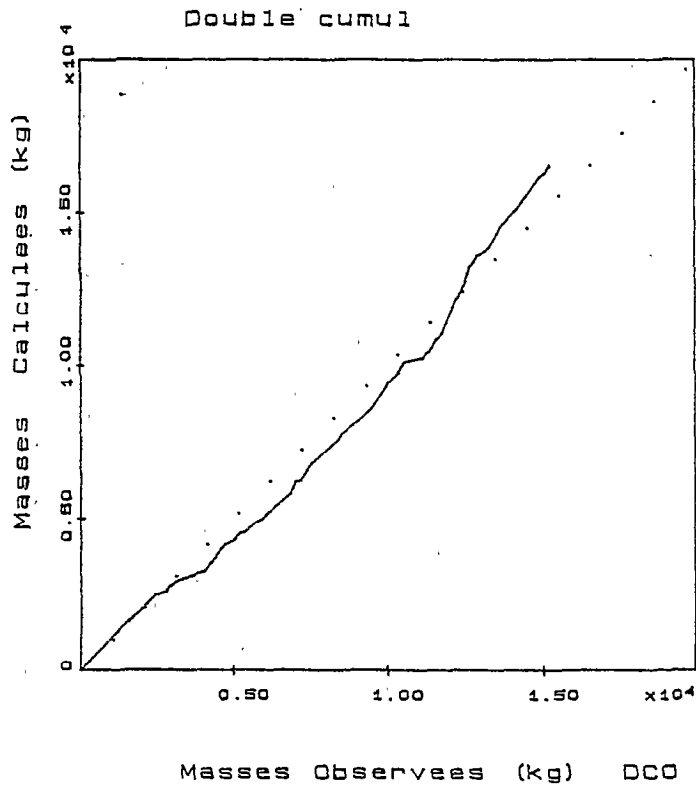
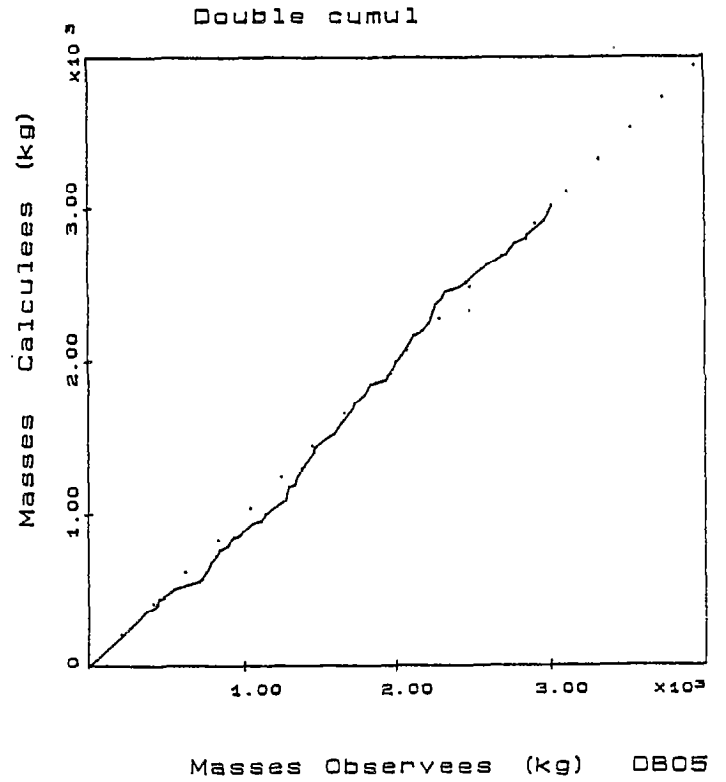
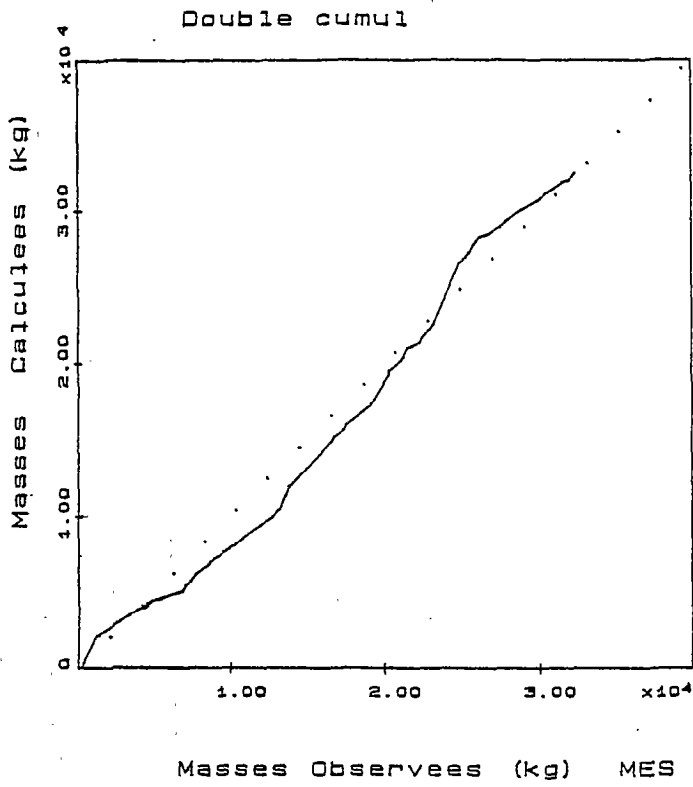


Figure : 20 - E-K' Imax5 β' Vr Y'

Bassin versant:

Les Ulis

Double cumul : masses calculées - masses observées
(sur la totalité de la période d'enregistrement)

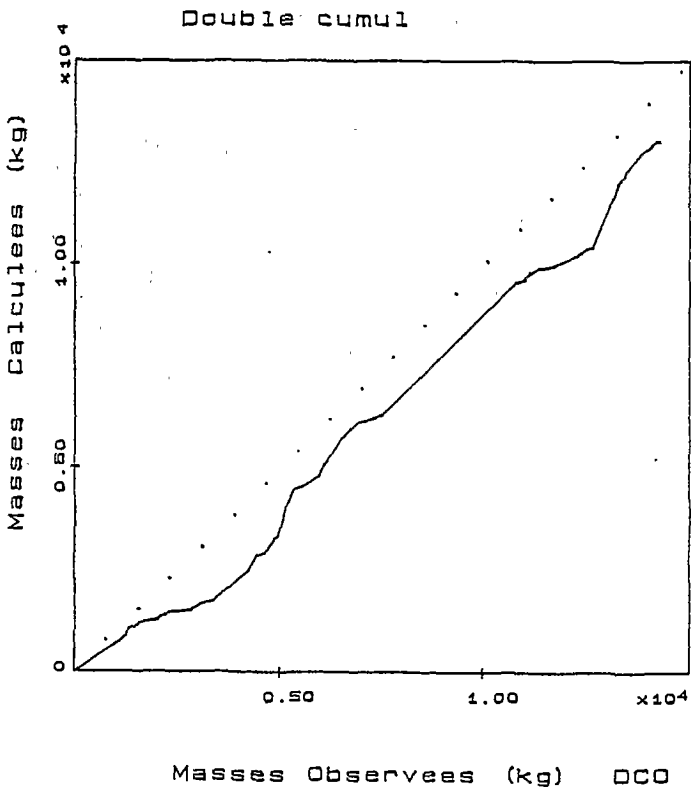
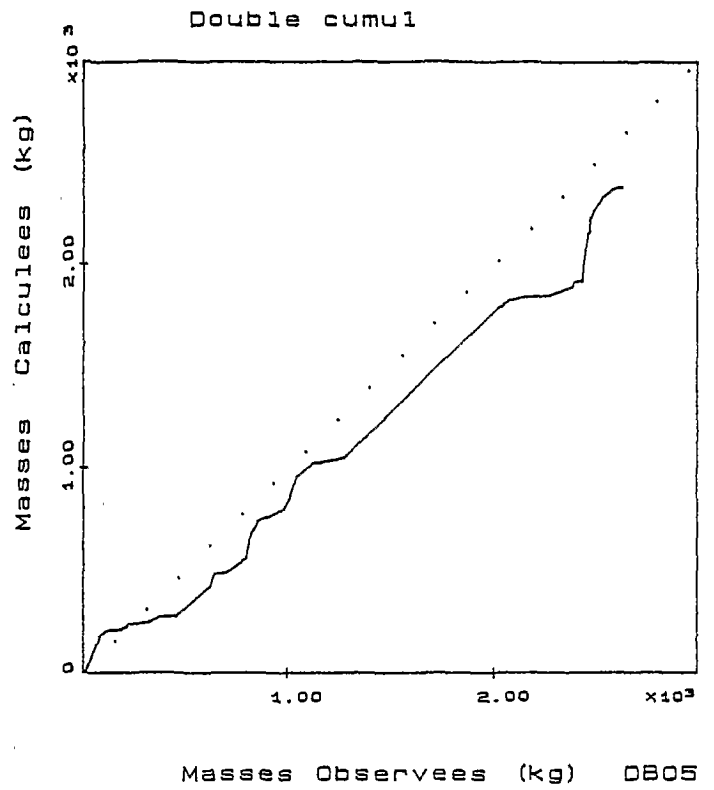
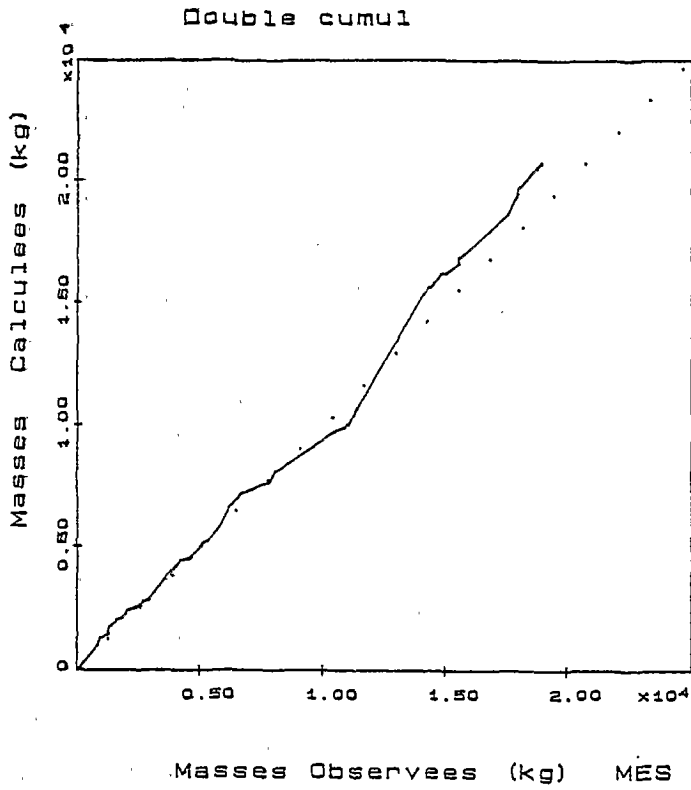


Figure :21 - E-K' Imax5 β' Vr γ'

Bassin versant: Aix-ZUP

Double cumul : masses calculées - masses observées
(sur la totalité de la période d'enregistrement)

	MES		DBO5		DCO	
	LES ULIS	AIX ZUP	LES ULIS	AIX ZUP	LES ULIS	AIX ZUP
K'	1-5	>1	0.3-3	0.08-0.6	0.4-1.3	0.9-7
β'	0.8-1.2	<1	≤ 0.5	0.7-0.95	0.35-0.7	0.65-0.85
γ'	0,2-0.7	-	0.25-0.65	0.5-0.65	0.4-0.8	0.4-0.6

Tableau 53 : Intervalles de variation des paramètres, définis dans chacun des cas après étude de sensibilité.

On trouvera en figures 22 et 23 des tracés en double cumul illustrant cette étude de sensibilité. Ils sont donnés à titre d'exemple (LES ULIS-MES et AIX-ZUP-DCO), les autres graphiques étant fournis en annexe.

5. CONCLUSION

En fonction du plan d'expérience défini pour la campagne de mesure expérimentale, notre objectif, en terme de modélisation, était double :

- reproduire la masse totale de pollution entraînée sur une longue durée (un an environ),
- reproduire la masse entraînée globalement au cours d'un événement pluvieux.

Un premier modèle d'entraînement faisant intervenir la notion de masse disponible (elle-même calculée à l'aide d'un modèle d'accumulation linéaire), permet d'atteindre cet objectif avec une précision satisfaisante. Cependant, l'analyse de sensibilité du modèle 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.

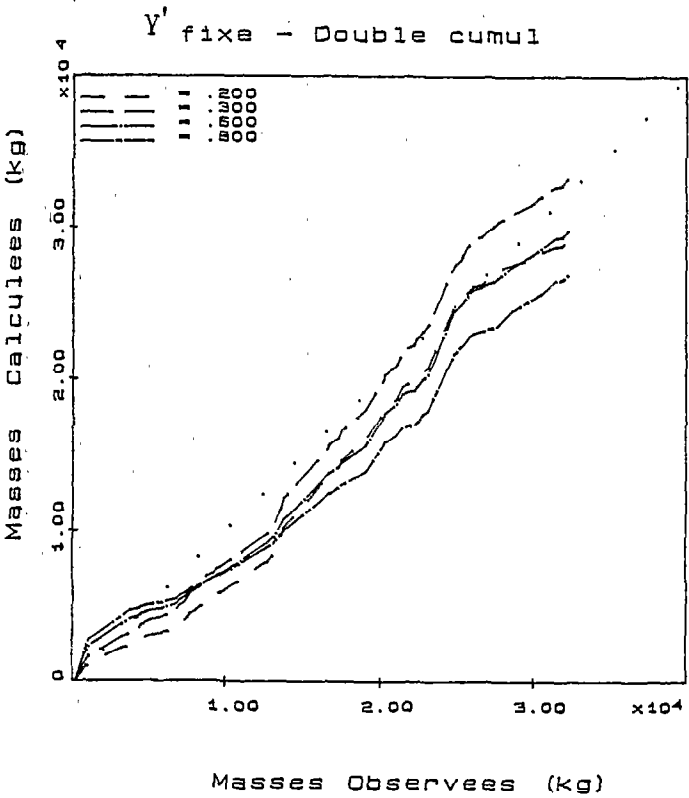
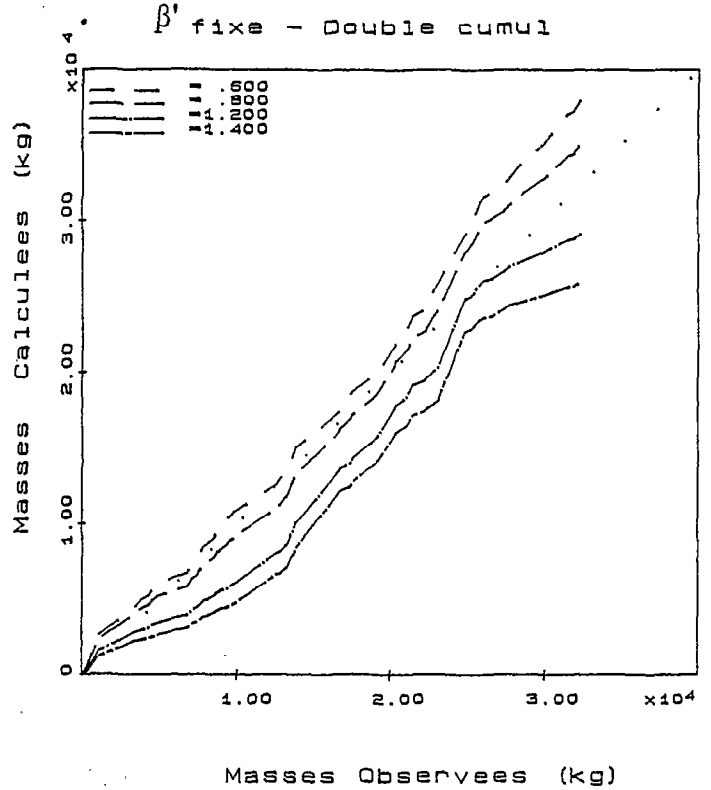
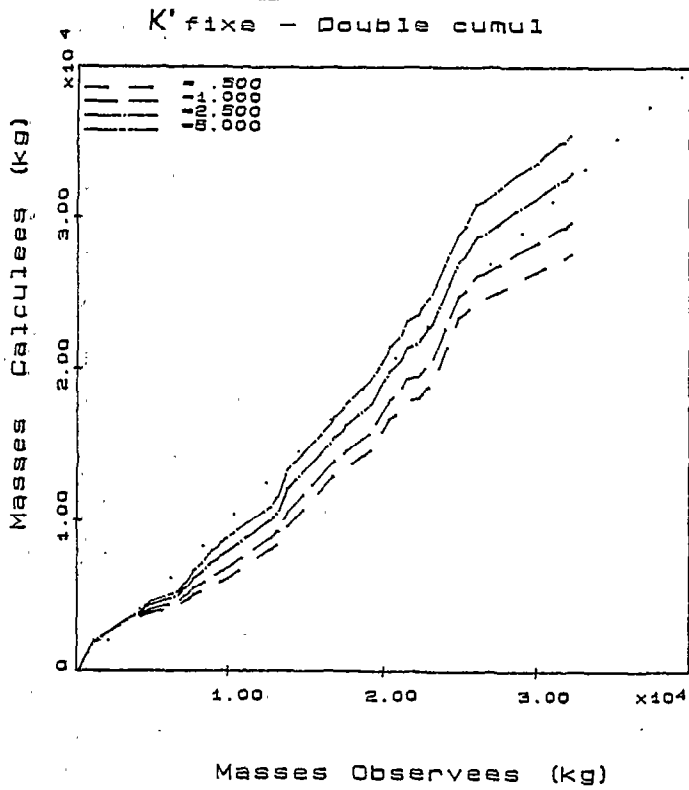


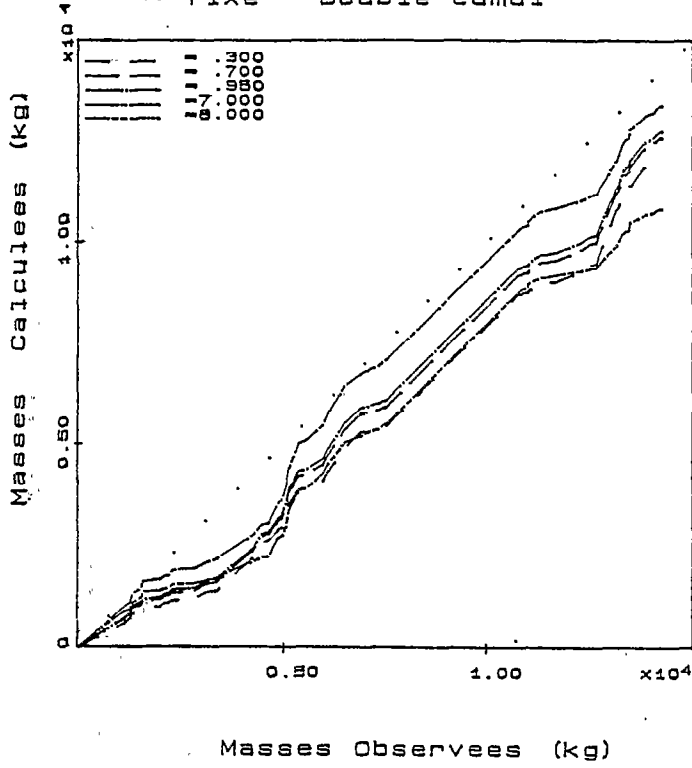
Figure : 22 $E = K' \text{Imax} 5^{\beta'} \text{Vr}^{Y'}$

Polluant : MES B.V. : Les Ulis

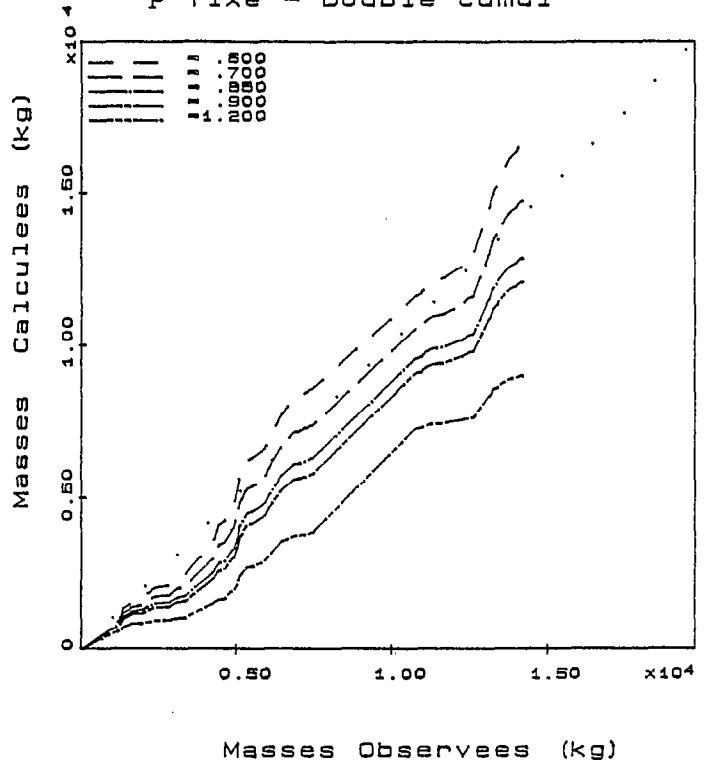
Etude de sensibilité des differents parametres

Double cumul : masses calcul es - masses observ es
(sur la totalité de la période d'enregistrement)

K' fixe - Double cumul



β' fixe - Double cumul



Y' fixe - Double cumul

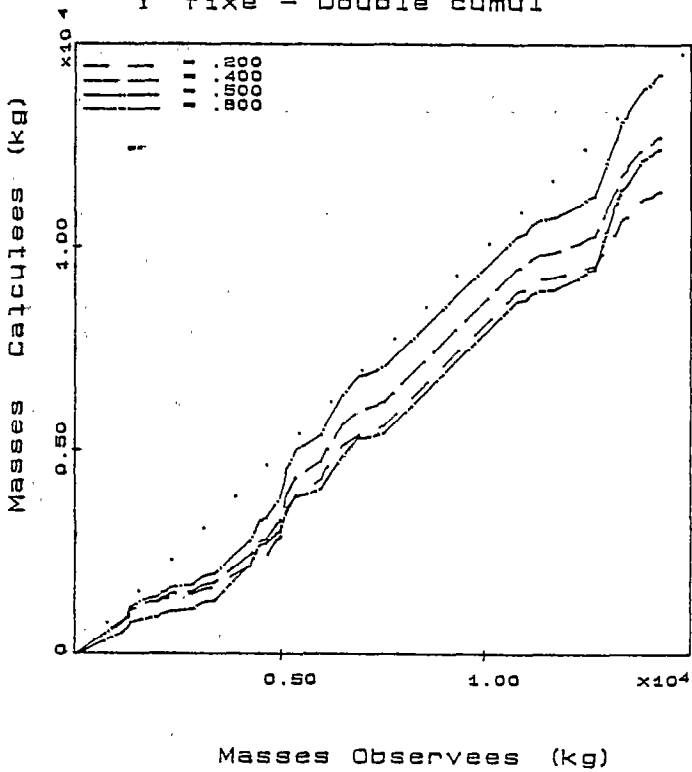


Figure :23

$$E = K' \text{Imax} 5^{\beta'} \text{Vr}^{Y'}$$

Polluant :DCO

B.V. : Aix-ZUP

Etude de sensibilite des differents parametres

Double cumul : masses calculées - masses observées
(sur la totalité de la période d'enregistrement)

La formulation est alors du type :

$$\text{Masse entraînée} = K' \cdot I_{\text{max}} 5^{\beta} V_r^{\gamma} \quad (4.12)$$

Le rôle de ces trois paramètres s'est vu conforté par l'analyse de sensibilité.

Un tel modèle, de mise en oeuvre plus aisée puisqu'il ne nécessite pas le calcul des masses disponibles, conduit à des résultats dont la précision est du même ordre :

± 5 % à ± 10 % sur les masses totales simulées sur une longue période,

± 10 % à ± 30 % sur les masses transportées au cours des principaux événements.

Les résultats pourraient, certainement, être améliorés par l'obtention de mesures supplémentaires ou de qualité encore meilleure. On peut proposer un certain nombre de points allant dans ce sens, nous y reviendrons dans les conclusions générales.

CONCLUSION

CONCLUSION

La campagne nationale de mesure de la pollution du ruissellement pluvial urbain, dont on ne connaît pas d'équivalent ailleurs, tant par sa durée que par son côté systématique, a fourni une masse d'informations de bonne qualité que nous avons pu exploiter.

On notera, à ce propos, que sur le plan méthodologique il apparaît que le suivi permanent de la campagne de mesure constitue une procédure bien adaptée à l'obtention d'une information de bonne qualité même si elle se révèle parfois lourde et contraignante, et donc coûteuse. La maîtrise acquise à cette occasion dans le domaine de la mesure pourra servir de référence dans le cas de futures expérimentations.

L'exploitation statistique des données a permis d'améliorer notre connaissance des phénomènes. L'utilisation conjuguée d'une méthode comme le "Stepwise" et de l'analyse en composantes principales amène à tirer plusieurs conclusions de nature à nous faire mieux comprendre l'accumulation et entraînement des polluants à la surface des bassins versants urbains :

- les conditions climatiques sur une période précédant l'événement considéré, et qui reste encore à définir avec précision, ont une influence sur l'accumulation des polluants à la surface des bassins versants. La seule durée de temps sec paraît actuellement insuffisante pour caractériser le phénomène. Il faudrait se pencher sur une définition non plus seulement quantitative mais également qualitative de la variable DTS faisant intervenir les antécédents pluviométriques.
- l'agressivité de la pluie, caractérisée par l'intensité maximale sur une courte durée (ici 5 minutes, mais on peut envisager des durées plus courtes) est responsable du décollement des matériaux accumulés en surface.

- parmi les équations de régression multiple celles de type monôme se révèlent les plus intéressantes dans la mesure où elles ne génèrent pas de valeurs négatives et où elles ne présentent pas d'ordonnée à l'origine.

En fonction du plan d'expérience défini pour la campagne de mesure expérimentale, notre objectif, en terme de modélisation, était double :

- reproduire la masse totale de pollution entraînée sur une longue durée (un an au moins).
- reproduire les masses entraînées globalement au cours d'un événement pluvieux, qu'il s'agisse de MES, de DCO ou de DBO5.

Dans cette optique, les travaux que nous venons d'exposer concernent deux approches conceptuelles différentes. Dans le premier cas, la masse disponible est un facteur limitant, dans le second cas, elle ne l'est pas. On considère en effet avec cette deuxième éventualité que le "stock" de pollution présent en surface est constitué de deux niveaux, le premier est fréquemment sollicité, le second ("niveau profond") l'est plus rarement et ne constitue pas un facteur limitant.

La formulation qui fait intervenir la masse disponible s'écrit :

$$\text{Masse entraînée} = K \cdot \text{Masse disponible}^\alpha \cdot I_{\text{max}}^\beta \cdot V r^\gamma \quad (5.1)$$

Le modèle d'accumulation nécessaire et retenu est linéaire et repose sur deux hypothèses de base :

- un taux de production journalière constant,
- l'entraînement sur une longue durée de tout ce qui a été produit.

Cependant, l'étude de sensibilité de ce premier modèle d'entraînement a montré que deux de ses quatre paramètres ne jouaient pas un rôle important.

On retiendra donc, de préférence, la formulation à trois paramètres, confortée par l'étude de sensibilité et conduisant à des résultats dont la précision est du même ordre ± 5 à 10% sur les masses totales entraînées sur une longue période, ± 10 à 30% sur les masses transportées au cours des principaux événements). Le modèle s'écrit alors :

$$\text{Masse entraînée} = K' \text{Imax5}^{\beta} \cdot V r^{\gamma} \quad (5.2)$$

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.

On peut, ainsi, faire quelques propositions allant dans ce sens et qui pourraient être retenues dans le cadre d'un futur plan d'expérience :

- la mise au point d'un appareillage peut être mieux adapté. Cela passe par la réalisation de certaines études préalables :
 - granulométrie des particules transportées,
 - existence ou non de gradients de concentration au sein des effluents véhiculés dans les collecteurs.
- l'installation à la surface des bassins versants expérimentaux de pluviographes à faibles temps d'intégration. Imax5 s'est révélé comme le paramètre représentatif de "l'agressivité" de la pluie. Cependant, nous ne disposons pas de mesures d'intensité sur des pas de temps plus courts (30 secondes ou 1 minute) qui pourraient se révéler plus significatives encore (SERVAT, 1984), bien que ces mesures ponctuelles ne soient que le témoin d'un phénomène spatialement distribué.

- l'enregistrement de variables climatiques telles que la vitesse du vent et l'humidité au moyen d'anémomètres et d'hygromètres installés sur les bassins versants. Ces variables ayant un rôle sur la structure des agrégats de polluants constitués en surface des B.V.
- la mesure des paramètres débitométriques par des méthodes plus performantes que celles utilisées jusqu'à présent. Les sondes à ultra-sons pourraient être une solution à ce problème.

Il serait également intéressant de se fixer maintenant comme but d'accéder à une échelle de modélisation plus fine. On disposerait alors d'un outil supplémentaire permettant de contrôler les rejets dans le milieu récepteur et d'en mieux maîtriser les impacts, ce qui constitue un des objectifs principaux de l'assainissement en zone urbaine.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALLEY W.M., SMITH P.E. (1982)

"Multi-event urban runoff quality model" U.S. Geological Survey Open File Report 82-764, Reston, VA.

AMMON D.C. (1979)

"Urban stormwater pollutant buildup and washoff relationships". Master of Engineering Thesis, University of Florida, Dept. of Environmental Engineering Sciences, Gainesville.

APWA (American Public Works Association) (1969)

"Water pollution aspects of urban runoff". U.S. Dept. of the Interior, Federal Water Pollution Control Administration.

AVCO Economic Systems Inc. (1970)

"Storm water pollution from urban land activity". FW QA Pub. n° 11034 FKL.

BELTON T.J., RUPPEL B.E., LOCKWOOD K. (1982)

"PCB's (Aroclor 1254) in fish tissues throughout the state of N.J. : a comprehensive survey". Office of Cancer and Toxic substances Research, New Jersey Department of Environmental Protection, Trenton, N.J.

BENNERSTEDT K., BRATTBERG G. (1984)

"Effects on lake Mälaren from combined sewer overflow". Third International Conference on Urban Storm Drainage, Göteborg, Sweden - 4-8 June.

BENZIE W.J., COURCHINE R.J. (1966)

"Discharges from separate storm sewers and combined sewers". Journal Water Pollution Control Federation, vol. 38, pp. 410-421.

BROEKER H.W. (1984)

"Impact of depositions on sewer operation". Third International Conference on Urban Storm Drainage, Göteborg, Sweden - 4-8 June.

BRUNNER P.G. (1977)

"Contribution of roadway usage to water pollution. A review of the research position". Wasserwirtschaft, 67, 98-101.

BUFILL M.C. (1984)

"Hydrological aspects of the study of non point pollution on a motorway catchment". Third International Conference on Urban Storm Drainage, Göteborg, Sweden, 4-8 June.

CASPERS H. (1978)

"The effect of storm drain outflow on the ecosystem of the Alster Lake and its canals in the centre of Hamburg". First International Conference on Urban Storm Drainage - Southampton - U.K.

CHATFIELD C., COLLINS A.J. (1980)

"Introduction to multivariate analysis". Science Paperbacks, Chapman and Hall, London, pp. 57-81.

CRAWFORD J.H., DONIGIAN A.S. (1973)

"Pesticide transport and runoff model for agricultural lands". EPA 660/2-74-013.

CUNGE J.A., HOLLY F.M. Jr, VERWEY A. (1980)

"Practical aspects of computational river hydraulics". Pittman Publishing Inc. Boston, MA.

DESBORDES M. (1985)

"Bilan des études et recherches sur la pollution du ruissellement pluvial urbain dans les pays de l'Europe de l'Ouest et de l'Amérique du Nord". L.H.M. - Université des Sciences - Montpellier - Note 18/1985.

DESBORDES M., DEUTSCH J.C., HEMAIN J.C. (1980)

"Urban runoff pollution in France : a national program". Actes du Colloque d'Helsinki, AIHS, Publ. 130, 8 p.

DESBORDES M., DEUTSCH J.C., SERVAT E. (1986)

"Approche modélisatrice de l'accumulation et du transport des MES à la surface des bassins versants urbains". S.H.F., 19è Journées de l'Hydraulique, Paris 9-11 septembre 1986, question II.

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.

DESBORDES M., SERVAT E. (1986)

"Proposition d'une méthodologie de mesure des matières solides en suspension présentes dans les eaux de ruissellement pluvial". Sciences et Techniques de l'Eau, vol. 19 n° 1, pp. 65-71.

DEVER R.J., ROESNER L.A., ALDRICH J.A. (1983)

"Urban highway storm drainage model, vol. 4". Surface Runoff Program, user's manual and documentation. FHWA/RD - 83/044, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

DONIGIAN A.S., CRAWFORD N.H. (1976)

"Modelling non-point pollution from the land surface". US EPA Ecological research series. Report EPA 600/3-76-083.

DONIGIAN A.S., DAVIS H.H. (1978)

"User's manual for agricultural runoff management (ARM) model". EPA - 600/3-78-080.

DRAPER N.R., SMITH H. (1967)

"Applied regression analysis". Wiley series in probability and mathematical statistics. John Wiley and Sons Inc., pp. 163-195.

ELLIS J.B. (1977)

"The characterisation of particulate solids and quality of water discharged from an urban catchment". Effects of urbanisation and industrialisation on hydrological regime and on water quality. IAHS/AISH. Publ. n° 123 - UNESCO.

ELLIS J.B. (1979)

"The nature and sources of urban sediments and their relation to water quality". Man's impact on the hydrological cycle in the U.K. Geobook - Norwich.

ELLIS J.B. (1985)

"Pollutional aspects of urban runoff". Urban Runoff Pollution - NATO ASI Series, vol. G10.

FERRARA R. (1985)

"Toxic pollutants : impact and fate in receiving waters". Urban Runoff Pollution - NATO ASI Series, vol. G10.

FIELD R., TAFURY A.N., MASTERS H.E. (1977)

"Urban runoff pollution control technology overview". Report EPA 600/2-77-047.

FISCHER H.B., LIST E.J., KOH R.C.Y., IMBERGER J., BROOKS N.H. (1979)

"Mixing in inland and coastal waters". Academic Press - New York.

GEIGER W.F. (1984)

"Characteristics of combined sewer runoff". Third International Conference on Urban Storm Drainage - Göteborg - Sweden - 4-8 June.

GEIGER W.F., DORSCH H.R. (1980,a)

"Quantity-quality simulation (QQS) : A detailed continuous planning model for urban runoff control". Vol. 1 Model description, testing and applications. EPA - 600/2-80-011.

GEIGER W.F., DORSCH H.R. (1980,b)

"Quantity-quality simulation (QQS) : A detailed continuous planning model for urban runoff control". Vol. 2, User's manual. EPA - 600/2-80-116.

GELDREICH E.E., BEST L.C., KENNER B.A., VAN DONSEL D.J. (1968)

"The bacteriological aspects of stormwater pollution". J.W.P.C.F. vol. 40, pp. 1861-1872.

GOETTLE A. (1978)

"Atmospheric contaminants fall out and their effects on storm quality". IAWPR, 9th International Conference, Stockholm, pp. 455-467.

GRAF W.H. (1971)

"Hydraulic of sediment transport". Mc. Graw Hill Book Company, New York.

HAAN C.T. (1977)

"Statistical methods in hydrology". Iowa state university Press/ames, pp. 236-245.

HAMILTON R.S., REVITT D.M., WARREN R.S., DUGAN M.J. (1985)

"Resuspension of heavy metals from road surface dust" in : Heavy metals in the environment, CEP Ltd, Edinburg.

HARREMOES P. (1982)

"Immediate and delayed oxygen depletion in rivers". Water Research, vol. 16, pp. 1093-1098.

HEANEY J.P., HUBER W.C., SHEIKH H., MEDINA M.A., DOYLE J.R., PELTZ W.A., DARLING J.E. (1975)

"Urban stormwater management modeling and decision making". EPA 670/2-75-022 (NTIS PB-242290).

HEDLEY G., KING M.V. (1971)

"Suggested correlations between storm sewage characteristics and storm overflow performance". Proc. Inst. Civ. Eng. 48 : 399-411.

HEMAIN J.C. (1981)

"Statistical analysis of runoff quality data from french and U.S. catchments". Second International Conference on Urban Storm Drainage, Illinois - U.S.A.

HEMAIN J.C. (1983,a)

"Mesure de la pollution du ruissellement pluvial urbain. Rapport n° 1 : Suivi et bilan de la campagne expérimentale". L.H.M. Université des Sciences. Montpellier. Note 21/83.

HEMAIN J.C. (1983,b)

"Mesure de la pollution du ruissellement pluvial urbain. Rapport n° 2 : Exploitation des données". L.H.M., Université des Sciences, Montpellier, note 25/83.

HEMAIN J.C. (1983,c)

"Mesure de la pollution du ruissellement pluvial urbain. Rapport n° 3 : Interprétation des résultats". L.H.M. Université des Sciences, Montpellier, note 38/83.

HEMAIN J.C. (1984)

"Mesure de la pollution du ruissellement pluvial urbain. Rapport n° 4 : Exploitation des données autres que MES, DCO et DB05". L.H.M., Université des Sciences, Montpellier, note 8/84.

HEMAIN J.C. (1985)

"Statistically based modeling of urban runoff quality : State of the art". Urban Runoff Pollution - NATO ASI Series, vol. G10.

HOGLAND W., BERNDTSSON R., LARSON M. (1984)

"Estimation of quality and pollution load of combined sewer overflow discharge". Third International Conference on Urban Storm Drainage - Göteborg - Sweden - 4-8 June.

HUBER W.C., HEANEY J.P., MEDINA M.A., PELTZ W.A., SHEIKH H., SMITH G.F. (1975)

"Storm water management model. User's manual, version II". EPA-670/2-75-017 (NTIS PB - 257809).

HUBER W.C., HEANEY J.P., NIX S.J., DICKINSON R.E., POLMANN D.J. (1981)

"Storm water management model user's manual, version III". EPA - 600/2-84-109a (NTIS - PB84 - 198423).

HUBER W.C. (1985)

"Deterministic modeling of urban runoff quality". Urban runoff pollution - NATO ASI Series. Vol. G10.

HVITVED-JACOBSEN T. (1982)

"The impact of combined sewer overflows on the dissolved oxygen concentration of a river". Water Research, vol. 16, pp. 1099-1105.

HVITVED-JACOBSEN T. (1985)

"Conventional pollutant impacts on receiving waters". Urban Runoff Pollution - NATO ASI Series. Vol. G10.

HVITVED-JACOBSEN T., YOUSEF Y.A., WANIELISTA M.P., PEARCE D.B. (1984)

"Fate of phosphorus and nitrogen in ponds receiving highway runoff". Int. Symp. on Highway Pollution, London, UK. 6-9 septembre 1983. The science of the total environment, 33, pp. 259-270.

HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER (1977)

"Storage, treatment, overflow, runoff model, STORM, User's manual". Generalized computer program 723-S8-L7520, Corps of Engineers, Davis, CA.

JEWELL T.K., ADRIAN D.D. (1982)

"Statistical analysis to derive improved stormwater quality models" J.W.P.C.F., 54 (5), pp. 489-499.

JOHANSON R.C., IMHOFF J.C., DAVIS H.H. (1980)

"User's manual for hydrological simulation programm - Fortran (HSPF)" EPA 600/9-80-015.

KAY S.H. (1984)

"Potential for biomagnification of contaminants within marine and freshwater food webs". US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station. Vicksburg, MS Technical report D-84-7.

KEEFER T.N., SIMONS R.K., Mc QUIVEY R.S. (1980)

"Dissolved oxygen impact from urban storm runoff". Proceedings of the National Conference - Orlando - Florida (novembre 1979) EPA 600/9-80-056, pp. 223-244.

KITE G.W. (1975)

"Confidence limits for design events". Wat. Res. Res., vol. 11 n° 1, pp. 48-53.

KITE G.W. (1976)

"Frequency and risk analyses in hydrology". Inland waters directorate. Water resources branch. Applied hydrology division. Network planning and forecasting section, Ottawa, Canada.

KLUESENER J.W., LEE G.F. (1974)

"Nutrient loading from a separate storm sewer in Madison, Wisconsin". J.W.P.C.F., vol. 46, pp. 920-936.

LAVALLEE P. (1980)

"Les impacts sur les eaux réceptrices de la pollution diffuse urbaine". Thèse Maîtrise ès-Sciences, I.N.R.S. Eau, Université du Québec, Québec.

LINDHOLM O.G. (1978)

"Modelling of sewerage systems". Mathematical models in water pollution control. John Wiley and Sons, New York, Chapter 10.

LINDHOLM O.G. (1984)

"Dry weather deposition in combined sewers". Third International Conference on Urban Storm Drainage - Göteborg - Sweden - 4-8 June.

MALMQUIST P.A. (1983)

"Urban stormwater pollutant sources". Chalmers Univ. of Technology - Göteborg - Sweden.

MANCINI J.L. (1980)

"Impacts of intermittent urban discharges on receiving waters". Proceedings of the National Conference, Orlando, Florida. 26-28 novembre 1979 - EPA 600/9-80-056.

MARSALEK J. (1985)

"Toxic contaminants in urban runoff : a case study". Urban Runoff Pollution - NATO ASI Series, vol. G10.

MELANEN M.J. (1981)

"Quality of runoff water in urban areas". 123-190 - Publ. 42. Water Research Inst., National Board of waters, Helsinki.

MELANEN M.J., LAUKKANEN R.H. (1980)

"Urban runoff quality in Finland and its dependence on some hydrological parameters". IAWPR/Pergammon Press Ltd. Prog. Wat. Tech. 12 : 1073-1083.

METCALF and EDDY Inc., UNIVERSITY OF FLORIDA, WATER RESOURCES ENGINEERS (1971,a)

"Storm Water Management Model - Vol. 1. Final report". U.S. EPA Water Pollution Control Research Series, 11024 DOC 07771, 352 p. (NTIS : PB 203-289).

METCALF and EDDY Inc., UNIVERSITY OF FLORIDA, WATER RESOURCES ENGINEERS (1971,b)

"Storm Water Management Model - Vol. 2. Verification and Testing". U.S. EPA Water Pollution Control Research Series, 11024 DOC 08171 (NTIS : PB 203 290).

MILISIC V. (1976)

"Contribution à l'analyse du phénomène de suspension". Thèse Université P. Sabatier - Toulouse.

NAKAMURA E. (1984,a)

"Factors affecting stormwater quality decay coefficient". Third International Conference on Urban Storm Drainage - Göteborg - Sweden. 4-8 June.

NAKAMURA E. (1984,b)

"Factors affecting the removal rate of street surface contaminants by overland flow". Journal of research. Public Works Research Institute.

Ministry of Construction - Japan.

NEELY W.B. (1980)

"Chemicals in the environment-distribution, transport, fate, analysis". Marcel Dekker, Inc. New York.

NOVOTNY V., CHESTERS V. (1981)

"Handbook of non-point pollution : sources and management". Van Nostrand Reinhold Co., New York.

OBERST G.L. (1982)

"Water resources management : non point source pollution". Tech. rep. 10-82-016. Metropolitan Council Publ., St Paul, Minnesota.

O.C.D.E. Water management policy group (1982)

"Program on control of diffuse sources of water pollution. Control of pollution from urban runoff". O.C.D.E. - Paris.

PISANO W.C., ARONSON G.L., QUEIROZ C.S., BLANC F.C., O'SHAUGHNESSY J.C. (1979)

"Dry weather deposition and flushing for combined sewer overflow pollution control". EPA - 600/2-79-133 (NTIS PB80-118524).

PISANO W.C., QUEIROZ C.S. (1977)

"Procedures for estimating dry weather pollutant deposition in sewerage systems". EPA - 600/2-77-120 (NTIS PB - 270695).

PITT R., BAZEMAN M. (1980)

"Water quality and biological effects of urban runoff on Coyote creek". In : Urban stormwater and combined sewer overflow impact in receiving water bodies - EPA 600/9-80-056.

PITT R., BAZEMAN M. (1982)

"Sources of urban runoff pollution and its effects on an urban creek". EPA 600/2-82-090.

POPE W.N., GRAHAM J.D., YOUNG R.J., PERRY R. (1976)

"Urban runoff from a road surface - a water quality study". Prog. Wat. Techn., 10, n° 5/6, pp. 533-543.

PRATT C.J., HARRISON J.J., ADAMS J.R.W. (1984)

"Storm runoff simulation in runoff quality investigations". Analysis and Design of Stormwater Systems. Chalmers Univ. of Technol., Göteborg - Sweden.

PRICE R.K., MANCE G. (1978)

"A suspended solids model for storm water runoff". First International Conference on Urban Storm Drainage. Southampton . U.K.

RANDALL C.W., HELSEL D.R., GRIZZARD T.J., HOEHN R.C. (1978)

"The impact of atmospheric contaminants on storm water quality in an urban area". IAWPR, 9th Intern. Conf., Stockholm, 417-431.

RANDALL C.W., GRIZZARD T.J., HELSEL D.R., GRIFFIN Jr D.M. (1981)

"Comparison of pollutant mass loads in precipitation and runoff in urban areas". Second International Conference on Urban Storm Drainage, University of Illinois, Urbana-Champaign, 2, 29-38.

RAY S.M., TRIEFF N.M. (1980)

"Bioaccumulation of anthropogenic toxins in the ecosystem". Environment and health - Ann Arbor Science Publishers, inc. Ann Arbor, Mi.

REVITT D.M., ELLIS J.B., OLDFIELD F. (1981)

"Variation in heavy metals of stormwater suspended solids in a separate sewer system". Second International Conference on Urban Storm Drainage, Illinois, U.S.A., 2, 49-58.

RIBSTEIN P., DESBORDES M. (1978)

"Etude de la qualité du ruissellement urbain. Synthèse bibliographique". L.H.M., Rapport 45/1978, 55 p.

ROESNER L.A., NICHANDROS H.M., SHUBINSKI R.P., FELDMAN A.D., ABBOTT J.W., FRIEDLAND, A.O. (1974)

"A model for evaluating runoff-quality in metropolitan master planning". ASCE Urban Water Resources Research Program. Technical Memorandum n° 23 - ASCE New York.

ROESNER L.A., SHUBINSKI R.P., ALDRICH J.A. (1981)

"Storm Water Management Model - User's manual version III : Addendum I, EXTRAN". EPA - 600/2-84-109b (NTIS : PB 84-198431).

ROSENBROCK (1960)

"An automatic method for finding the greatest or least value of a function". Computer Journal, vol. 3, n° 3, pp. 175-184.

RYLAND BROWN E., GREEN R.S. (1980)

"Urban stormwater impacts on receiving streams in North Carolina". In : Urban stormwater and combined sewer overflow impact on receiving water bodies. EPA 600/9-80-056, 197-223.

SARTOR J.D., BOYD G.B. (1972)

"Water pollution aspects of street surface contaminants" URS Research Company for US EPA Office of Research and Monitoring, Env. Prot. Techn. Series, EPA R2 72-08.

SCHILLING W. (1982)

"Cisterns against storms" in : Urban Drainage Systems. Pentech Press - London.

SCHILLINGER J.E., GANNON J.J. (1985)

"Bacterial adsorption and suspended particles in urban stormwater". JWPCF, vol. 57, n° 5, pp. 384-389.

SERVAT E. (1984)

"Contribution à l'étude des matières en suspension du ruissellement pluvial à l'échelle d'un petit bassin versant urbain". Thèse Docteur-Ingénieur, Université des Sciences - Montpellier.

SERVAT E. (1985,a)

"Mesure de la pollution du ruissellemnt pluvial urbain. Campagne expérimentale française. Rapport de synthèse". L.H.M., Université des Sciences - Montpellier - Note 1/85.

SERVAT E. (1985,b)

"Etude de la DB05 et de la DCO du ruissellement pluvial urbain. Essai de modélisation". L.H.M.,
Université des Sciences - Montpellier - Note 11/85.

SERVAT E. (1985,c)

"TSS, BOD5 and COD accumulation and transport over urban catchment surfaces : a modeling
approach". Urban Runoff Pollution. NATO ASI Series, vol. G10.

SHAHEEN D.G. (1975)

"Contribution of urban roadway usage to water pollution". EPA 600/2-73-261.

SHUBINSKI R.P., KNEPP A.J., BRISTOL C.R. (1977)

"Computer program documentation for the continuous storm runoff model SEM-STORM".
Report to Southeast Michigan Council of Governments, Water Resources Engineers,
Springfield, VA.

SOLOMON S.I., GUPTA S.K. (1977)

"Distributed numerical model for estimating runoff and sediment discharge of ungaged rivers. 2.
Model development". Water Resources Research. 13 (3) : 619-629.

SONNEN M.B. (1980)

"Urban runoff quality : information needs". Journal of the technical councils, ASCE. 106 (TC1) :
29-40.

STOTZ G., KRAUTH K. (1984)

"Factors affecting first flushes in combined sewers". Third International Conference on Urban
Drainage - Göteborg - Sweden - 4-8 June.

SUEISHI T., MORIOKA T., KAWAMOTO S. (1984)

"Comparison among models for stormwater and pollutant runoff in view of their reliability, sensitivity and applicability". Third International Conference on Urban Storm Drainage - Göteborg - Sweden - 4-8 June.

THOMANN R.V. (1978)

"Size dependent model of hazardous substances in aquatic food chain". EPA 600/3-28-036.

TOMLINSON R.D., BEBEE B.N., LAZOFF S., SWARTZ R.G., SPYRIDAKIS D.E. (1980)

"The distribution of sediments and particulate contaminants from combined sewer and storm drain overflows in Seattle's nearshore waters". In : Urban Stormwater and combined sewer overflow impact on receiving water bodies. EPA 600/9-80-056, pp. 115-147.

U.S. EPA. Water planning division (1983)

"Results of the nationwide urban runoff program - volume I - final report". US EPA, Washington, DC.

VILLENEUVE J.P., LAVALLEE P. (1985)

"Measured CSO contribution to river quality deterioration and methodologic approach for negative influence evaluation". Urban Runoff Pollution - NATO ASI Series - vol. G10.

WALLER D., HART W.C. (1985)

"Solids, nutrients and chlorides in urban runoff". - Urban Runoff Pollution - NATO ASI Series - vol. G10.

WEIBEL S.R., ANDERSON R.J., WOODWARD R.L. (1964)

"Urban land runoff as a factor in stream pollution". Journal of the Water Pollution Control Federation, n° 36-7, 914-924.

WHIPPLE W., HUNTER J.V., YU S.L. (1977)

"Effects of storm frequency on pollution from urban runoff". Journal of the Water Pollution Control Federation - pp. 2243-2248.

WISCHMEIER W.H., SMITH D.D. (1958)

"Rainfall energy and its relationship to soil loss". Transactions American Geophysical Union. 39 (2) : 285-291.

WISCHMEIER W.H., SMITH D.D. (1965)

"Predicting rainfall erosion losses from Cropland East of the Rocky Mountains". Agricultural Handbook 282, U.S. Dept. of Agriculture, Washington, DC.

YOUNG R.L. (1970)

"Above lake Needwood". In : Trends in Parks and Recreation, Jan-Feb. 1970.

ANNEXES

SOMMAIRE DES ANNEXES

Annexe 1 : Publications et Communications

Annexe 2 : Tracés des histogrammes de fréquences et des courbes de fréquences relatives cumulées

Annexe 3 : Tracés relatifs à l'étude de sensibilité des différents paramètres.

ANNEXE 1 :

PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Communication au "Third International Conference on Urban Storm Drainage" - Göteborg - Sweden - 4-8 June 1984.

Communication au séminaire OTAN : "Urban Runoff Pollution" - Montpellier - Août 1985.

Publication dans Sciences et Techniques de l'Eau - Février 1986.

Communication aux 19^è Journées de l'Hydraulique de la S.H.F. - Paris - Septembre 1986.

Communication au "Fourth International Conference on Urban Storm Drainage" - Lausanne - Suisse - Septembre 1987.

Solids in Urban Runoff

Statistical Analysis of French Experimental Data

Michel Desbordes and Eric Servat
Laboratoire d'Hydrologie Mathématique
Université des Sciences et Techniques
34060 Montpellier Cédex, France

ABSTRACT

From a very general point of view, solids should be considered as one of the basic indicators of pollutional aspects of urban runoff. Total suspended solids (T.S.S.) data, observed at the outlets of four catchments (carefully selected within the framework of the french national programme on urban runoff pollution study), have been analysed to detect relationships with different characteristics of rainfall events. First of all, a classical multivariable analysis has been conducted to determine the most important hydrological parameters related to T.S.S. concentrations. A Principal Component Analysis was then performed to complete the results obtained at the first step of the study. At last, using an adaptative approach, the Kalman Filter, has allowed to optimize the preceding relations and to detect interesting events from a methodological point of view.

Keywords : Urban Runoff, Urban Runoff Suspended Solids,
Multivariable analysis, Kalman Filtering.

Research on urban runoff pollution has begun in France in the middle of the 70's. With the evergrowing urbanization it has been quickly pointed out that urban runoff pollution should have significant impact on receiving water bodies.

In order to allow quick estimates of runoff quality, researchers have defined a lot of parameters or indicators which, in turn, may be easily related to urbanization characteristics. Due to high costs of water quality data collection and analysis programs, the number of these indicators must be as limited as possible. Among all of them, suspended solids (SS) is probably one of the most significant because :

- they have bad effects in reducing the photo synthesis activities due to the turbidity they may create, in covering water plants, etc...
- their organic part even if limited, leads to a depletion of dissolved oxygen, in receiving water bodies, by biological and chemical reactions
- they may transport important loads of toxic substances (heavy metals, pesticides, micropollutants,...) which are adsorbed on solid particles.

Moreover, S.S. may create a lot of stormsewers systems maintenance problems related to :

- increasing hydraulic roughness values,
- reduction of the flow capacity of sewers,
- pollution incidents in detention basins in recreational areas, etc...

Some good urban runoff S.S. data banks have been already established, mainly in north american countries. However, they may reflect specific urbanization conditions, or data collection programs aims. So it was decided to define a national program on runoff pollution study. The measurement period has taken place from October 1980 to December 1982. It has been done for four well selected urban catchments (Hémain, 1983). The main characteristics of the catchments are given in Table 1.

The present paper only shows a facet of the whole study. It is concerned with research of relationships between S.S. mean concentrations, C.S.S., during a rainfall event and rainfall, runoff and climatic parameters. Three methods have been used mainly ; a multiple regression analysis, a principal components analysis and a Kalman Filtering approach of the data series.

MULTIPLE REGRESSION ANALYSIS

A so called "Stepwise" procedure has been performed (Chatfield and Collins, 1980 ; Hémain, 1981). The confident threshold for hypothesis testing of zero correlation coefficient value was 5 %.

Tested explanatory variables

In a first step, simple regression procedures have allowed to retain 9 explanatory variables among all those which have been considered for C.S.S. explanation. They are :

(5)*QMAX : peak discharge (l/s)

(9) ITC : mean maximum intensity during the time of concentration(mm/h)

* (code numbers in Principal components analysis - see after)

Catchment	MAUREPAS	LES ULIS	AIX ZUP	AIX NORD
Catchment location	near Paris	near Paris	South of France	South of France
Area (ha)	26.7	43.1	25.6	92
Mean Slope (%)	0.5	0.55	2.9	6.5
Imperviousness (%)	60	42	78	35
Single Family housing (% of whole area)	70	0	0	30
Multiple Family housing (% of whole area)	17	100	100	60
Population density (persons/ha)	100	350	210	40
Roofs types	Flat	Flat	Flat	40 % Flat 60 % Steep Slopes
Sewers types	Autocleaned Storm sewer	Autocleaned Storm sewer	Autocleaned Storm sewer	Autocleaned Storm sewer
Number of analysed events in the present study	89	62	48	44
C.S.S. observed values (mg/l) :				
Mean	185	512	288	471
Min - Max	21 - 894	40 - 2480	22 - 976	15 - 3780

- (10) IMAX5 : mean maximum intensity during a 5 mn time interval (mm/h)
(7) HP : total rainfall depth during the event to be considered (mm)
(8) DP : rainfall event duration (days)
(4) DR : runoff duration (days)
(11) DTS : duration (days) of the dry weather period preceding the event
(14) H7 : rainfall depth during the seven days preceding the event (mm)
(12) HDERUI : rainfall depth since the last event for which runoff has been observed (including dew, fog or small rainfall events)

One must note, as it will be shown after, that some of these variables should be more or less correlated. HDERUI and H7 may be considered as wetness indicators and should have some influence on surface dusts consolidation, making them more or less erodable. Dry weather period duration DTS has been defined as the time elapsed between the end of the last observed runoff and the beginning of the rainfall event to be considered.

Results of the stepwise regression analysis

Best simple correlation coefficients for the 9 explanatory variables combinations are listed in Table 2. So are listed the best simple correlation coefficients between C.S.S. and one of the 9 explanatory variables.

As it has been said before, some rainfall or runoff variables are strongly correlated. Correlations seem to be more significant for the southern catchments (AIX) than for the northern ones.

Relationships	AIX ZUP	AIX NORD	LES ULIS	MAUREPAS
QMAX ; ITC	0.975	0.957 ^A	0.907	0.961
QMAX ; IMAX5	0.964	0.948	0.825	0.869
ITC ; IMAX5	0.989	0.913	0.857	0.910
DP ; DR	0.932	0.928	0.857	0.831
C.S.S. and one of the 9 variables	0.419 IMAX5	0.916 IMAX5	0.617 DTS	0.668 DTS

Two explanatory variables, IMAX5 and DTS, seem to be well correlated with mean suspended solids concentrations, C.S.S.. Moreover, these variables are the same for each pair of catchments with the same climatic conditions. That last observation is confirmed by the stepwise regression analysis whose results are given in Table 3 (C.S.S. are given in mg/l).

Looking at the results of Table 3, one should conclude that C.S.S. are strongly depending on climatic or regional parameters. The relationships are very similar for the catchments in the Paris areas. For the catchments in the south of France, the high correlation coefficient between C.S.S. and IMAX5, for the AIX NORD catchment, should be resulting from the steep slopes of overlandflow (up to 8 % in some place) and from natural contributing zones under high intensities rainfall events. During such events, S.S. loads are higher and have a high weight in correlation analysis.

Table 3. "Stepwise" Regression Relationships.

Catchment	"Stepwise" Relationships	Correlation Coefficients
AIX ZUP	CSS = 302 + 4.51 IMAX5 - 3.37 H7	0.516
AIX NORD	CSS = -15.14 + 35.37 IMAX5	0.916
LES ULIS	CSS = 125.52 + 58.7 DTS + 13.49 IMAX5	0.691
MAUREPAS	CSS = 68.22 + 22.94 DTS + 3.42 IMAX5	0.701

One should make some climatic hypothesis regarding the "deposit-removal-transportation" phenomena of S.S. In the south of France (AIX), dry weather periods are much more longer (almost twice) than in the north, on an average basis. So dusts should be more consolidated and their removal should necessitate higher rainfall intensities. In southern areas, IMAX5 should be a good indicator of rainfall erosivity. Moreover, as overlandflow peak discharges are generally strongly correlated with IMAX5, solids transports in overlandflow and consequently in

autocleaned sewers, that is to say measured SS loads, are correlated with IMAX5. That is probably the reason why IMAX5 appears in all the relationships listed in Table 3.

In the north of France (MAUREPAS ; LES ULIS), dry weather periods are shorter, so dusts should be less consolidated, and the catchments are washed off by rainfall more frequently. The dry weather period duration DTS seems to be the best explanatory variable in that case, as it explains potential SS loads between two rainfall events.

However these observations are only hypothesis. Experimental conditions only give CSS at one point of a very complex process including solids production, deposit, consolidation, erosion by rainfall, removal by overlandflow, transportation in sewers, etc... The problem is mathematically undefined without making a lot of conceptual, logical or rational hypothesis. Unfortunately some groups of hypothesis should belong to different concepts while starting from the same data analysis. For example, if solids production and deposit should explain most of the variability of the measured CSS (autocleaned sewers, catchments almost totally washed off after most of the events) one should make the assumption that the deposit process nature should have strong influence on linear relationships as given in Table 3. If solids deposit increases linearly with DTS, that last variable may be well linearly correlated with CSS (northerne catchments for example). Now the linear hypothesis should be unrealistic and the solids deposits should be asymptotically limited ; for longer DTS (as in southern catchments), CSS and DTS should not be linearly correlated. Such asymptotic limits for surface solids deposits have been proposed by some researchers (Hémain, 1980). Some more measurements such as dayly mean wind speed , wetness, etc. should make easier the choice between groups of hypothesis.

PRINCIPAL COMPONENTS ANALYSIS

P.C.A. can be used from a qualitative point of view in order to reduce dimensionality of a p-dimensional space described by p more or less linearly correlated variables. For each catchment we have applied PCA to 15 variables describing what should be called an "event" regarding the SS whole process. The aims of the analysis was to look for some arrangements of "events" in a reduce space. A Wilson-Hilferty transform has been applied to the variables in order to make their distributions close to normality. The 15 variables group was composed of the 9 ones defined above, to which have been added :

- (3) VR : runoff volume (m3)
- (6) QS : dry weather flow (l/s)
- (12) HPRUI : rainfall depth during the last event for which runoff has been observed (may be different from HDERUI) (mm)
- (15) H14 : rainfall depth during the 14 days preceding the event (mm)
- (16) H28 : rainfall depth during the 28 days preceding the event (mm)
- (17) CSS : (mg/l)

Figures 1 and 2 are given as examples for the AIX ZUP catchment. Figure 1 gives for the two first components plane, locations of variables (indicated by their code numbers). Figure 2 gives for same plane, locations of individuals, i.e. of "events".

For the three first components, the total explained variances reaches

Figure 1. Principal Components Analysis. Catchment : AIX ZUP
Location of the "events"

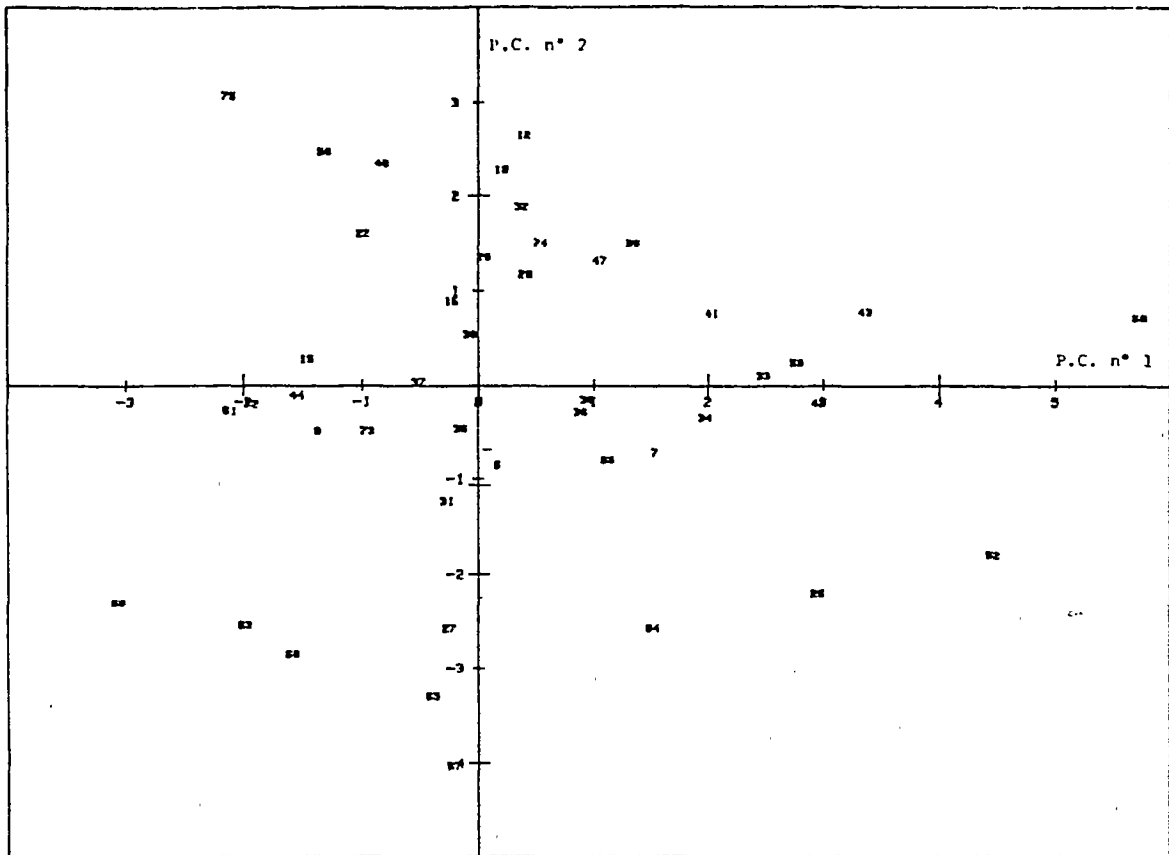
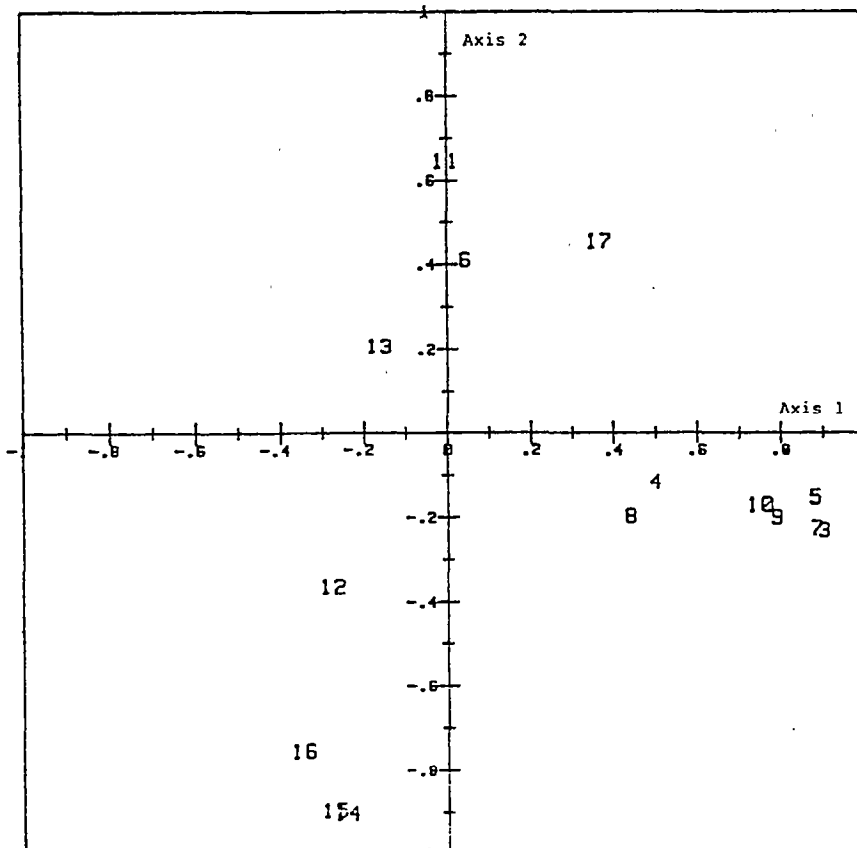


Figure 2. Principal Components Analysis. Catchment : AIX ZUP
Location of the variables



67 % (LES ULIS) to 72 % (AIX ZUP). The distribution of variance among each component is similar from one catchment to another (Table 4).

Table 4. Percentage of explained variance in P.C.A.

Catchments	Axis 1 (%)	Axis 2 (%)	Axis 3 (%)	Axis 4 (%)
AIX ZUP	33	22.6	16	71.6
AIX NORD	33.5	21.4	14.1	69
LES ULIS	33.6	19	14	66.6
MAURFPAS	38	19	12	69

However, percentages of explained variance, for one given component, are rather low, which should indicate that "SS events" space dimensionality could not be reduced without significant losses of the information content. That last observation is confirmed when looking at the correlations between principal components and variables. Results listed in Table 5 are rather homogeneous. They indicate that the first component is mainly characterized by VR, QMAX and ITC, the second one by H7, H14 and H28, while the third one is not so well defined.

Table 5. P.C.A. Axis characterization

Catchments	Axis 1	Axis 2	Axis 3
AIX ZUP	VR ; QMAX ; HP	H7 ; H14 ; H28	CSS
AIX NORD	VR ; ITC	H7 ; H14 ; DTS	-
LES ULIS	VR ; QMAX	H7 ; H14 ; H28	DP
MAUREPAS	QMAX ; ITC ; IMAX5	-	-

Finally P.C.A. confirms that a "SS event" cannot be defined by only a few variables as indicated by multiple regression analysis. Moreover, P.C.A. shows that such "SS events" should be characterized by rainfall-runoff variables (VR, QMAX, ITC, IMAX5) and climatic variables of the period preceding the rainfall-runoff event to be considered (H7, H14, H28, DTS). Among these last ones, the only DTS variable, seems to be inadequate for a precise knowledge of the runoff SS process, evaluated by the measurement of CSS at a given catchment outlet.

KALMAN FILTERING APPROACH

The Kalman filtering procedure (KFP) is a well-known adaptative process, optimizing the regression parameters of linear regressions in order to take into account systematic errors or random changes that could occur, between two successive events. The process will not be described here and the reader will find more detailed informations in a lot of references (Mehra, 1970 ; Amirthanathan, 1982).

K.F.P. has been performed on the simple regression equations, i.e. $CSS = f(IMAX5 \text{ or } DTS)$, the events being ordered in time in a first classical KFP use, then being classified in order of increasing CSS values.

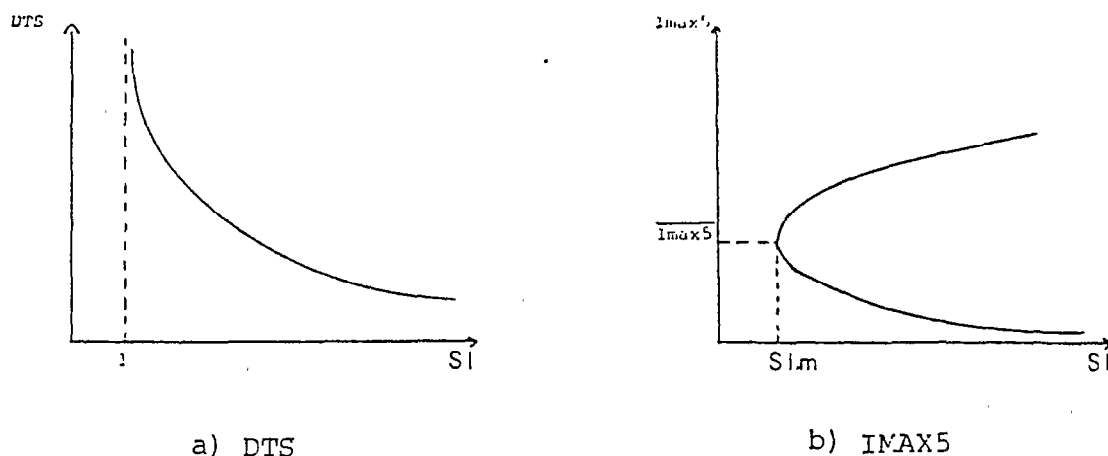
Errors structures estimates

K.F.P. may be efficient when the errors structures are known. In our case, errors not only contain systematic errors of IMAX5 or DTS measurements, but also errors of simple linear regression model adequacy.

As CSS results in a areal rainfall-runoff process, mean areal rainfall intensity during 5 minutes, IAM5, should be more adequate than point IMAX5. We have made the assumption that the variance of error SI should be parabolic according to Figure 3, the minimum value S_{Im} corresponding to mean IMAX5, $\overline{IMAX5}$, $S_{Im} = 0.05 \overline{IMAX5}$.

For DTS we have made the assumption that the variance of errors of measurements is in inverse ratio to DTS it self (cf. Figure 3). Effectively the measurements of the very short dry periods have seemed to us to be the most tainted with error.

Figure 3. Variance of the errors of DTS and IMAX5 measurements.



For the model adequacy the errors structure has been defined in order to satisfy optimality filtering conditions. According to Mehra (1970) this implies that the residuals $v = (CSS_o - CSS_c)$, between observed and calculated values of CSS, must be a "white noise", i.e. the residuals should be purely random. It can be shown that autocorrelation coefficients with a lag $j = 1, \dots, k$, must be in the confident interval, the 95 % confident limits of which being $\pm 1.96 \sqrt{N}$ ($N =$ sample size). Optimality conditions lead to slowly adaptative filtering procedure which is in agreement with our qualitative analysis by the Kalman filtering process.

Results for C.S.S. time series

For each catchment we have studied simple linear relationships such as :

$$CSS = A + Bx(\text{IMAX5 or DTS})$$

looking for A and B optimized parameters, according to K.F.P.

The procedure has been first performed for an homogeneous sample, excluding high CSS and DTS or IMAX5 values, then for the whole sample.

Figures 4 and 5 give examples of temporal variations of optimized A and B parameters (Figure 4) and correlographs of v residuals (Figure 5) for AIX ZUP catchment. No specific trends have been detected, even if A and B parameters have been adapted according to K.F.P. Returning to events for which A and B significant changes can be noted, it has not been possible to find systematic combinations of hydrological or climatic parameters which could explain them, during the period preceding these significant changes. This may be due probably to the low filtering procedure which has been adopted, combined to the rather low adequacy of the linear regression model.

However, the KFP procedure allows to test the CSS time series and to detect local changes that can be analysed. They may be related to some failures in the measurement procedure or to specific event.

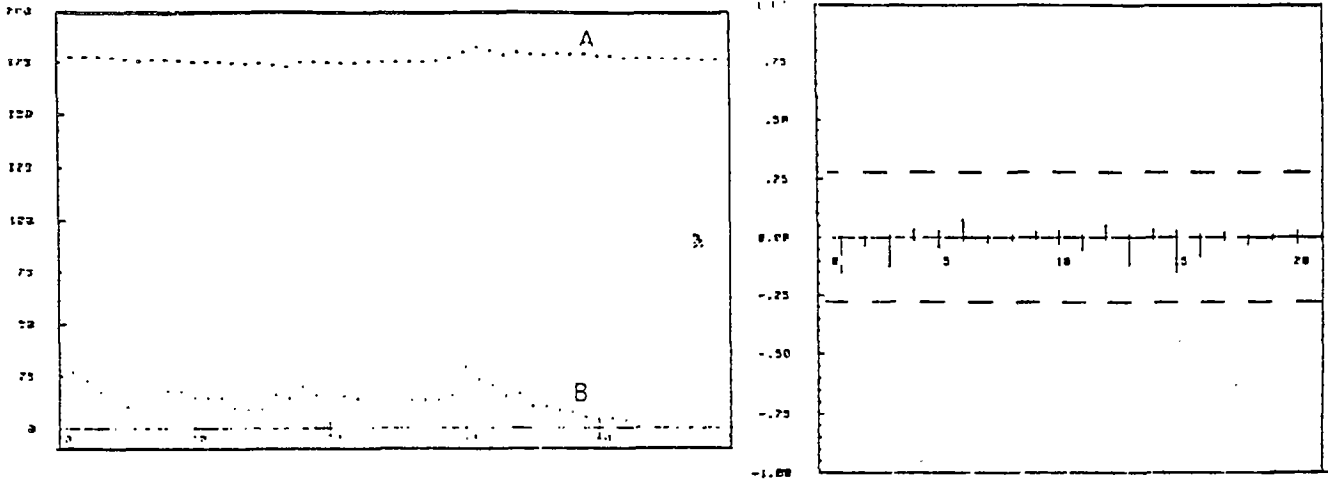


Fig.4 Temporal variation of parameters Fig.5 Correlograms of residuals
AIX ZUP CS \bar{S} = A+BxIMAX5 ("whole sample")

Results for C.S.S. classed in increasing order of magnitude

This is a less frequent use of K.F.P. We have made the assumption that C.S.S. measurement was a stationary process. We have so tested the effects of increasing C.S.S. values on A and B regression parameters according to K.F.P.

For IMAX5, Figure 6 indicates a regular increase of A and B parameters with increasing C.S.S. values. However no significant polynomial fits were established. So C.S.S. should be explained by other variables than the only IMAX5.

For DTS the trends could be fitted by such an equation as proposed by other investigators (Hémain, 1980) :

$$M(DTS) = a (1 - e^{-b DTS}) \quad \text{or} \quad M(DTS) = a DTS / (b DTS + c)$$

M being the solids mass accumulated over the catchments during the dry weather period duration DTS.

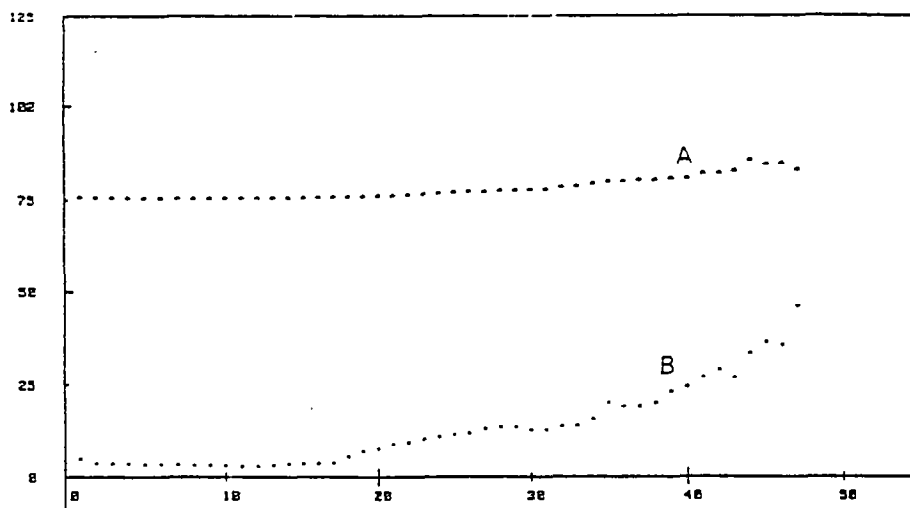


Figure 6. Variation of regression parameters.
Catchment : AIX NORD
(C.S.S. classed in increasing order of magnitude)
C.S.S. = A+BxIMAX5

The mean C.S.S. values of the national runoff quality measurement program, supported by the Technical Service of Urbanization of the French Ministry of Urbanization and Housing, have been analysed by three complementary procedures, in order to detect the main explanatory variables of C.S.S. values.

The classical "stepwise" procedure has shown that 50 % of the total variance should be explained by one or two variables only. These are :

- mean maximum 5 minutes rainfall intensity IMAX5 which should characterize rainfall intensity and solids transport indirectly
- dry weather duration DTS which should characterize solids accumulation and consolidation.

The weight of these two variables seems to be different for different climatic conditions encountered in the studied catchments.

The Principal Components Analysis indicates similar results as the first axis characterizes hydrological parameters effects (rainfall-runoff) while the second one mainly reflects climatic parameters influences during the period preceding a given event.

The Kalman Filtering Procedure, has been performed on C.S.S. time series and C.S.S. ordered in increasing values. The general trends indicate that C.S.S. modeling is depending on antecedent weather conditions and on the magnitude of hydrological variables. The K.F.P. has allowed to detect "unnormal" events that will be separately examined in order to increase modeling adequacy. They can be due to experimental failures in the measurement process or to natural departures from modeling concepts.

The three procedures lead to the same conclusions :

- antecedent climatic conditions during a not yet well defined period preceding a given rainfall event have great influences on C.S.S. values,
- the whole solids transform process cannot be precisely modeled by linear model between C.S.S. and hydrological or classical parameters, even in the case of small well defined urban catchments with autocleaned sewers.

In order to go further in solids process modeling we need some more informations and measurements. Conceptual modeling of different steps of the whole process (production, consolidation, erosion) should be established with specific measurements including climatic variables (mean speed wind, wetness, etc...). Moreover C.S.S. measurements should be carefully checked in order to limit uncertainties increasing C.S.S. modeling difficulty.

REFERENCES

- Amirthanathan, G.E. (1982). Contrib. des techniques de filtrage optimal à quelques problèmes hydrologiques. Th. D.I., U.S.T.L. Montpellier.
- Chatfield, C. and Collins, A.J. (1980). Introduction to multivariate analysis. Chapman and Hall ed. London.
- Hémain, J.C. (1980). Approche méthodologique pour l'étude de la pollution du ruissellement pluvial urbain. Th. D.I., U.S.T.L. Montpellier.
- Hémain, J.C. (1981). Statistical analysis of runoff quality data from french and u.s. catchments. 2nd conf. on Urban Storm Drainage, 2, Illinois University, Urbana.
- Hémain, J.C. (1983). Mesure de la pollution du ruissellement pluvial urbain. Suivi et bilan de la campagne de mesure. LHM 21/83. U.S.T.L.
- Mehra, R.K. (1970). On the identification of variances and adaptative Kalman filtering. I.E.E., Trans. on automatic control AC15 n°2, p.175-184

TSS, BOD5 AND COD ACCUMULATION AND TRANSPORT OVER URBAN CATCHMENT SURFACES: A MODELLING APPROACH

Eric Servat
Laboratoire d'Hydrologie Mathematique
Universite des Sciences et Techniques du Languedoc
34060 Montpellier Cedex
France

Introduction

There is an increasing awareness of pollution problems in urban sewer management. This is the reason why, in France, a national experimental program on urban runoff pollution has been started (3). In the study reported in this paper, the data which have been collected for more than one year from the four experimental catchments (Maurepas and Les Ulis near Paris, Aix-Zup and Aix-Nord in Aix-en-Provence) have been used. We propose here to develop a modeling approach for the production-accumulation mechanisms and for the surface transport of TSS, BOD₅ and COD. For TSS, we will summarize the main results and refer the reader to already published papers (5). Several rainfall-runoff pollution modeling objectives can be theoretically defined. Nevertheless, the nature and accuracy of the available data will set certain model limits. Within the defined framework of the French experimental catchment program, monitoring was carried out at the outfalls of various watersheds. The raw data were based on several samples collected during rainfall events and thus sampling can be viewed as a spatially-varying phenomenon that can be characterized by a pollutant mean concentration value. The modeling approach we have developed is directly derived from the objectives of the national monitoring program to determine estimates of transported pollutant mass over a long duration (about one year) and for a "space scale" which relates to small catchments (less than 50 ha).

Empirical modeling of the rainfall-runoff process has been shown to possess certain limits (5). Moreover, it appears that the determination of statistical relationships would be unduly influenced by high magnitude events for which the probability of occurrence is quite low.

For these reasons a conceptual procedure is proposed which is compatible with the representativeness of the sampling program and with the trends arising from the data analysis (5,6).

TSS Accumulation and Transport Modelling Approach

This section summarizes the main results for the modeling approach developed earlier (2,5).

A linear TSS accumulation model, based on the following hypotheses, was selected :

- A constant production rate within a given time interval.
- An initial mass of pollutant (stock) close to the final one on the surface of the catchment when considered over a long time period.
- The transported mass during an event i is less than or equal to the available one, i.e., $E_i \leq M_{di}$.

In such cases, the accumulated mass is taken to be proportional to the dry weather period:

$$A_i = Pr \times DT_{Si} \quad (\text{Eq. 1})$$

in which :

A_i = accumulated mass (kg) over catchment surface during dry weather period DT_{Si} (in time interval units) which separates rainfall events i and $i-1$.

Pr = TSS production rate during a time interval (kg/time interval unit).

it is then possible to write (5):

$$Pr = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{\sum_{i=1}^n DT S_i} \quad (\text{Eq. 2})$$

Pr, as computed by Equation 2, was checked such that the constraint $E_i \leq M_{di}$ was appropriate for each event.

The computed daily production rate for the catchments under consideration are:

- 1.7 kg ha⁻¹ d⁻¹ in Aix-Zup
- 2.6 kg ha⁻¹ d⁻¹ in Maurepas
- 3.1 kg ha⁻¹ d⁻¹ in Les Ulis

(we could not model masses in Aix-Nord because of unresolved problems in volume estimates).

Examination of the chronology of sampled rainfall events can determine successive residual masses over the catchment surfaces within the limits of an undetermined constant. Indeed, we have assumed that a full surface "wash up" has been reached once in order to be able to compute Pr (see Fig. 1, Maurepas example). Given that the previous hypotheses was verified, the proposed linear accumulation model was adopted in preference to others (e.g. asymptotic accumulation, power function accumulation, parabolic accumulation with an upper limited stock, different from the chosen criteria)(5). With regard to TSS transport, the objective of the modeling procedure was to reproduce the transported mass during each event and also the total transported mass within the observed event series. Three control variables were chosen for this step:

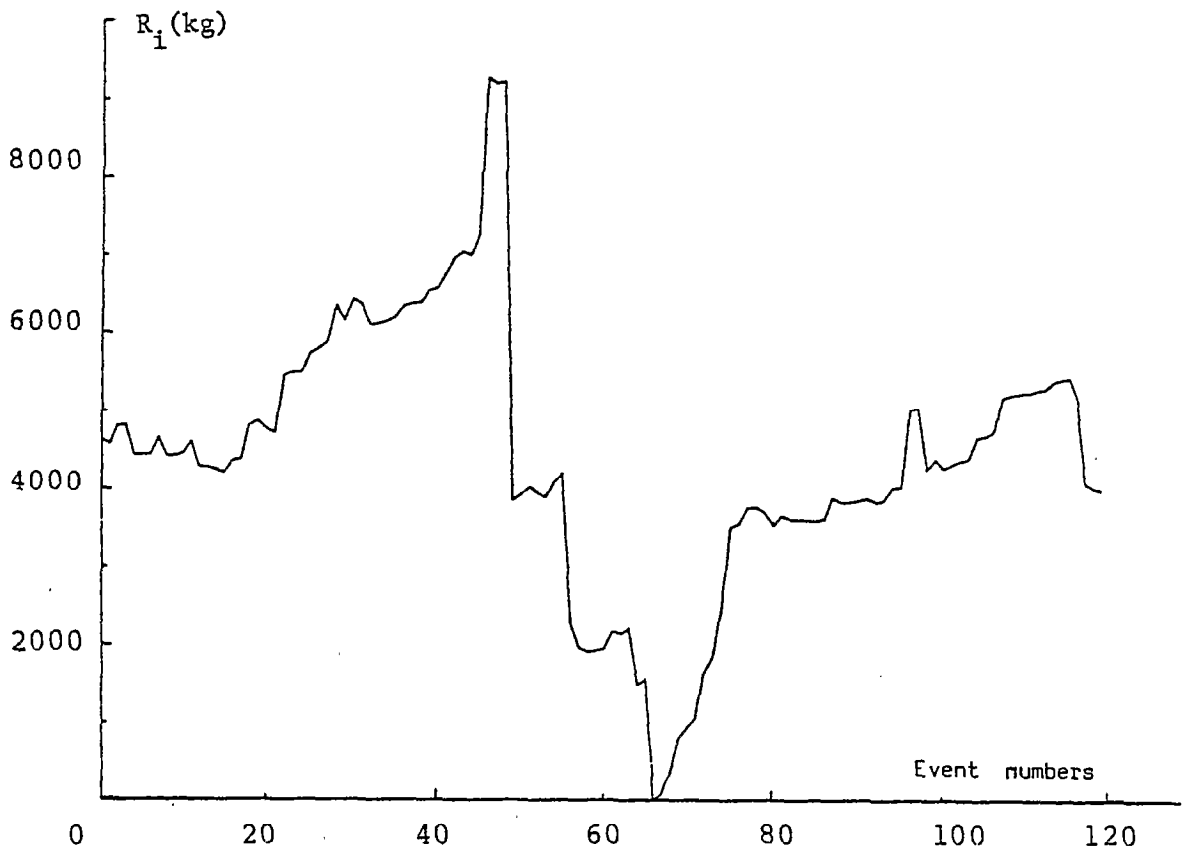


Figure 1 - Residual mass over catchment surface (R_i) after each rainfall event.

Catchment: Maurepas
(Linear accumulation model)

- Available mass, M_d (kg)
- Maximum intensity within a five-minute time interval, $I_{max\ 5}$ (mm h^{-1})
- Runoff Volume, V_R (m^3)

The chosen model is:

$$E = K \cdot M_d^\alpha \cdot I_{max\ 5}^\beta \cdot V_R^\gamma \quad (\text{Eq. 3})$$

in which:

E = transported mass during any event (kg)

M_d , $I_{max\ 5}$, V_R = defined above

K , α , β , γ , = parameters peculiar to each catchment.

Model parameters were identified using Rosenbrock's method (4), based on the minimization of the sum of the square of the deviations between observed and computed values, subject to the two following constraints:

- The transported mass cannot be negative.
- The transported mass cannot be greater than the available one.

Table 1 summarizes the values of K , α , β and γ .

Table 1 - K , α , β , γ values for each catchment

	$E = K M_d \text{ I}_{\max 5} \text{ VR}$		
	AIX-ZUP	LES ULIS	MAUREPAS
K	0.697	0.996	0.412
α	0.324	0.161	0.165
β	0.636	0.818	0.921
γ	0.307	0.421	0.382

In each case the different parameters have comparable values. This is interesting and positive in so far as one of the aims is to obtain a transport law that could be generalized, at least in terms of its form.

Results expressed as deviations and criterion functions are given in Table 2. The reproduction of the total observed transported mass shows reasonable accuracy as an absolute value. For events with high transported masses, the difference between observed and computed mass varies between $\pm 10\%$ and $\pm 30\%$. This is quite good, since it embraces most of the particle masses which are discharged to the receiving waters.

Table 2 - Results for the three experimental catchments:
Total Suspended Solids - TSS

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

	AIX-ZUP	LES ULIS	MAUREPAS
Average carried mass (kg)	225.56	417.70	187.25
Average quadratic deviation as a % of the average carried mass	14.1%	10.7%	10.6%
Criterion function	50.981	92.757	20.408
Observed and computed total mass deviation (%)	- 5.8%	+ 5.3%	- 13.0%
Deviation-calibration (%)	- 6.1%	1.4%	12.0%
Deviation-verification (%)	- 5.6%	9.8%	- 33.6%

Rainfall intensity within a five minute time interval is the lowest time boundary used to determine rainfall aggressivity during the French national program. The use of other rain gauges with very low integration times should supply data on rainfall aggressivity which is even more representative. Additional climatic variables such as wind speed, humidity, etc... would further improve the results.

BOD5 and COD Accumulation and Transport Modeling Approach

As a first step, a statistical analysis of the observed mean concentrations and masses was performed (6). The results are similar to those we could get for TSS. Concerning the observed BOD₅ and COD masses, which are the parameters we are interested in, the explanatory variables seem to be I_{max5} and VR, and to

a lesser degree the dry weather period between two rainfall events (DTS). The transport model will be partially built up from these first results.

Accumulation Modelling Approach

Four pollutant accumulation models were tested including an asymptotic model, a power function, a parabolic model with an upper limited stock, and a linear model.

The asymptotic model:

$$M(t) = M(t_0) e^{-K(t-t_0)} + \frac{Pr}{K} (1 - e^{-K(t-t_0)}) \quad (\text{Eq. 4})$$

in which:

$M(t)$ = accumulated mass in time t (kg).

K = part of the accumulated particles removed during a time interval.

Pr = pollutant production rate during a time interval (kg/time interval unit).

However, this model was found to produce daily rates much too high, for BOD₅ and COD, except if the asymptote is reached after a two month period ($K = 0.025$). Such a model is not appropriate for a phenomenon for which the time scale is on the order of a "few days". The power function model can be written:

$$M(t) = a t^n \quad (\text{Eq. 5})$$

in which :

$M(t)$ = accumulated mass in time t (kg).

a = function of the pollutant production rate during a time interval, Pr .

and $n < 1$.

To compute a , we can assume that for $t_c = x$ days, we have:

$$\frac{d M(t)}{dt} = 0.05 Pr \quad (\text{Eq. 6})$$

$$t = t_c$$

It is then possible to compute a and Pr for different values of n . Plausible values of daily production rates of pollutants (BOD_5 and COD) were reached for low n ($n = 0.2$) and high t_c ($t_c = 60$ days) (see Table 3).

Table 3 - BOD_5 and COD Daily Production Rates

(Kg ha⁻¹ d⁻¹)
 $n = 0.2$ $t_c = 60$ days

	AIX-ZUP	LES ULIS	MAUREPAS
BOD_5	.3	.2	.5
COD	8.6	1.5	3.7

However, as for the previous scheme, these results are not representative of the studied phenomenon. To get such values of Pr , if Equation 6 is confirmed with $t_c = 10$ days, n should be about 10^{-3} or 10^{-4} , which has no meaning.

For the parabolic model with an upper limited stock:

$$M(t) = -\alpha \frac{t^2}{2} + Pr t \quad (\text{Eq. 7})$$

where:

$M(t)$ = accumulated mass in time t (kg)

$\alpha = f(Pr)$

It has also been assumed that for $t_c = x$ days, Equation 6 is verified. The upper limit of the stock is reached when:

$$\frac{dM(t)}{dt} = 0 \quad t = t_{\text{lim}} \quad (\text{Eq. 8})$$

As in the two previous modeling approaches, we have computed Pr for several hypotheses. Results do not agree with the "time-scale" of the phenomenon in so far as they seem to be plausible for t values about 60 days for BOD_5 and for COD, as given by Equation 6.

As a result, the linear accumulation model was chosen. Conceptually, it may not be the most satisfactory model, given that such a model does not consider the degradation phenomenon that should occur with BOD_5 and COD. However, the measuring procedures may not be accurate enough to allow a modeling approach that integrates pollutant degradation.

Given the hypotheses developed for TSS:

- A constant production rate within a time interval.
- An initial stock close to the final one on the surface catchment when considered over a long time observation.
- The transported mass during an event i less or equal to the available mass ($E_i \leq M_{di}$).

It is then possible to write Equation 2 for BOD_5 and COD:

$$Pr = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{\sum_{i=1}^n DTS_i}$$

- E_i = transported mass during a rainfall event i
 DTS_i = the dry weather period which separates rainfall events i and $i-1$.

The computed daily production rates are in Table 4.

Table 4 - BOD₅ and COD Daily Production Rates, Linear Accumulation Model

	Pr (kg ha ⁻¹ d ⁻¹)		
	AIX-ZUP	LES ULIS	MAUREPAS
BOD ₅	0.22	0.26	0.16
COD	1.20	1.25	1.10

Results agree with previous hypotheses except for Les Ulis, where the final stock is very different from the initial one, considering BOD₅ as well as COD. This could be due to a measuring procedure failure but this cannot be confirmed. This is the reason why two transport modeling approaches have been tested. The first one considers the available mass as a variable of the model, the second does not (since none of the accumulation models tested is fully satisfying).

Transport Modelling Approach

As mentioned before, two approaches were tested:

- The first one, given by Equation 3, is similar to the TSS model and considers the three same control variables:
 - Available mass, Md (kg)
 - Maximum intensity within a five minute time interval, I_{max5} mm/h)
 - Runoff volume, VR (m³)

- The second one considers a two-level pollution stock on the catchment surface: a first level which is usually requested, and a second one, called "deep level", which is sometimes requested but which cannot be a bounding factor. In this case, two control variables are sufficient, I_{max5} and VR . The proposed equation is given by:

$$E = K' I_{max5}^{\beta'} VR^{\gamma'} \quad (\text{Eq. 9})$$

For BOD₅ and COD, parameter optimization was carried out using Rosenbrock's method (4). In the case of the first approach, two types of constraints were considered for each event:

- The transported mass cannot be negative.
- The transported mass cannot be greater than the available one.

For the second modeling approach, only the first constraint applies.

$$* E = K Md^{\alpha} I_{max5}^{\beta} VR^{\gamma}$$

K , α , β and γ values are given in Table 5. Results expressed as deviations and criterion functions are in Tables 6 and 7 for BOD₅ and COD, respectively.

Table 5 - K , α , β , γ Values for each Catchment

E = K Md I _{max5} VR						
	AIX-ZUP		LES ULIS		MAUREPAS	
	BOD5	COD	BOD5	COD	BOD5	COD
K	1.255	0.795	0.555	0.820	0.361	0.122
α	-0.069	0.313	0.126	0.175	0.223	0.630
β	0.989	0.780	0.217	0.400	0.500	0.807
γ	0.227	0.226	0.451	0.506	0.291	0.142

Table 6 - BOD₅: Results for the Three Experimental Catchments
$$E = K M d^{\alpha} I_{\max 5}^{\beta} VR^{\gamma}$$

	AIX-ZUP	LES ULIS	MAUREPAS
Average carried mass (kg)	37.9	41.8	13.1
Average quadratic deviation as a % of the average carried mass	13.1%	7.9%	13.7%
Criterion function	1.208	0.528	0.145
Observed and computed total mass deviation (%)	10.4%	-6.1%	57.6%
Deviation calibration (%)	5.8%	2.5%	38.5%
Deviation-verification	26.8%	-14.7%	73.4%

Table 7 - COD: Results for the Three Experimental Catchments

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

	AIX-ZUP	LES ULIS	MAUREPAS
Average carried mass (kg)	213.8	205.2	85.5
Average quadratic deviation as a % of the average carried mass	9.8%	7.6%	12.0%
Criterion function	21.607	11.738	4.699
Observed and computed total mass deviation (%)	-5.2%	6.5%	73.4%
Deviation-calibration (%)	-1.0%	3.0%	26.6%
Deviation-verification (%)	19.8%	11.5%	137.6%

strictly speaking, this model should not have been used with Les Ulis data because one of the assumptions of the accumulation model was not met. The results are not as good as they were with TSS, especially those on the Maurepas catchment. There are large differences between calibration and verification results. Therefore, if the reproduction of the total observed transported mass is quite accurate (excluding Maurepas), we cannot say that the proposed modelling approach is a fully satisfying one.

$$* E = K' I_{\max} 5^{\beta'} VR^{\gamma'}$$

K' , β' and γ' values are given in Table 8. Results expressed as deviations and criterion functions are in Tables 9 and 10 for BOD₅ and COD, respectively.

Table 8 - K' , β' , and γ' Values for each Catchment

$$E = K' I_{\max} 5^{\beta'} VR^{\gamma'}$$

	AIX-ZUP		LES ULIS		MAUREPAS	
	BOD5	COD	BOD5	COp	BOD5	COD
K'	0.994	1.252	1.214	1.875	0.158	0.745
β'	1.085	0.793	0.216	0.398	0.462	0.739
γ'	0.148	0.464	0.459	0.579	0.534	0.487

Deviations between observed and computed masses are similar to those of the previous model. The reproduction of the total observed transported mass is not as good as it was with TSS, since differences between calibration and verification results are not at all negligible. However, results are of the same order as those obtained previously. The investigation shows that for the events with high transported masses, the differ-

Table 9 - BOD₅: Results for the Three Experimental Catchments

$$E = K' I_{\max} 5^{\beta'} VR^{\gamma'}$$

	AIX-ZUP	LES ULIS	MAUREPAS
Average carried mass (kg)	37.9	41.8	13.1
Average quadratic deviation as a % of the average carried mass	12.6%	7.8%	11.5%
Criterion function	1.121	0.520	0.103
Observed and computed total mass deviation (%)	-1.3%	-3.1%	25.1%
Deviation-calibration (%)	-0.25%	2.4%	13.0%
Deviation-verification (%)	-5.4%	-8.7%	35.0%

Table 10 - COD: Results for the Three Experimental Catchments

$$E = K' I_{\max} 5^{\beta'} VR^{\gamma'}$$

	AIX-ZUP	LES ULIS	MAUREPAS
Average carried mass (kg)	213.8	205.2	85.5
Average quadratic deviation as a % of the average carried mass	9.1%	7.4%	10.9%
Criterion function	18.502	11.150	3.948
Observed and computed total mass deviation (%)	-8.2%	10.0%	36.0%
Deviation-calibration (%)	-12.4%	-1.7%	-0.4%
Deviation-verification (%)	6.4%	27.0%	87.5%

ence between observed and computed masses is usually between $\pm 10\%$ and $\pm 30\%$, which is interesting in so far as it embraces most of the particle masses discharged to the receiving waters.

For the same level of accuracy, it seems more appropriate to use the second model, because it is not necessary to compute available masses of pollutant. For TSS, we think that the inclusion of climatic variables such as wind speed, humidity, etc... would further improve the results.

Likewise, more rain gauges, having very low integration times, could have shown much higher intensities with shorter time intervals (30 seconds or 1 minute) that would be even more representative of rainfall aggressivity. In urban areas, rainfall aggressivity must be considered as the most important index to explain the transport of pollutants, since once they have been entrained from the ground surface they are almost certain to be flushed by the runoff.

Several other formulations were not adopted (6), including:

$$E = K' M d (1 - e^{-\beta' I_{\max 5}}) V R^{\gamma'}$$

$$E = K' (1 - e^{-\beta' I_{\max 5}}) V R^{\gamma'}$$

$$E = K M d^{\alpha'} \left(1 - \frac{1}{I_{\max 5}^{\beta'} V R^{\gamma'}} \right)$$

$$E = K' I_{\max 5}^{\beta} + \delta DR + \gamma VR + \alpha$$

in which:

DR = runoff duration (days).

They were not adopted for several reasons:

- A mean quadratic deviation which varies too much from one catchment to another.

- The criterion function shows high values.
- Differences between calibration and verification are high.

Conclusions

Using data from a national experimental measurement program, the modeling objective was to reproduce the total TSS, BOD₅ and COD loads for selected urban catchments. A two-step approach involving accumulation and transport was first performed. This approach led to good results with TSS. A linear accumulation model was chosen, which depends on a constant daily production rate and on the assumption that over a long time period the total mass produced will be removed. Simulation and rainfall-runoff TSS transport was achieved using a three-variable model (available mass, rainfall intensity within a five minute time interval and runoff volume). The results are good ($\pm 5\%$) in so far as over a long time period the total transported mass can be reproduced by the following model:

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

The same two-step approach did not lead to the same level of accuracy for BOD₅ and COD, given that catchments could not satisfy the assumptions in the accumulation models tested.

A one-step approach was then tried to simulateon rainfall-runoff BOD₅ and COD transport. In this case, only two control variables were retained. This model is conceptually different because it assumes that available mass is not a limiting factor. Results are good enough ($\pm 10\%$) so that over a long time period, the total transported masses of BOD₅ and COD can be reproduced using the following relationship:

$$E = K' I_{max} 5^{\beta'} VR^{\gamma'}$$

The results, however, are not as good as those obtained for TSS.

For the Maurepas catchment, BOD₅ and COD computed balances are always overestimated, irrespective of the approach used. No explanation could be given for the discrepancy. More generally, for each pollutant and for each of the retained approaches, with respect to small events the reproduction of the observed masses is not very good, because the relative influence of one or another of the variables is not well known. For large-scale events, the level of accuracy (from $\pm 10\%$ to $\pm 30\%$) seems to be very acceptable.

The modeling of pollutant accumulation and transport phenomena presented here is undoubtedly subject to improvement. Such an improvement, however, would require the acquisition of more and different data such as wind speed, humidity, etc., or a methodology and a measurement protocol better suited to pollutant sampling. Likewise, other modelling objectives might be developed. Such formulations would necessarily provide alternative views of the modeled phenomena, since they would depend on shorter time intervals. Such formulations could include pollutogram reconstruction, real-time management, and the prediction of receiving water discharge.

References

1. Chatfield, C. and Collins, A.J. Introduction to multivariate analysis. Chapman and Hall ed., London. 1980.
2. Desbordes, M. and Servat, E. Solids in urban runoff. Statistical analysis of French experimental data. Third International Congress on Urban Storm Drainage, Goteborg, Sweden, 4-8 June, 1984.
3. Hemain, J.C. Mesure de la pollution du ruissellement pluvial urbain. Rapport 1 : Suivi et bilan de la campagne experimentale. Laboratoire d'Hydrologie Mathematique, USTL, Montpellier, France. Note LHM 21/83. 1983.
4. Rosenbrock. An automatic method for finding the greatest or least value of a function. Computer Journal, vol. 3, p. 175, 1960.

5. Servat, E. Contribution a l'etude des matieres en suspension du ruissellement pluvial a l'echelle d'un petit bassin versant urbain. These de Docteur-Ingenieur, 29 juin 1984, USTL, Montpellier, France, 182 pages + 189 p. annexes. 1984.
6. Servat, E. Etude de la DB05 et de la DCO du ruissellement pluvial urbain. Essai de modelisation. Laboratoire d'Hydrologie Mathematique, USTL, Montpellier, France, Note LHM 11/85. (a paraitre). 1985.

PROPOSITION D'UNE MÉTHODOLOGIE DE MESURE DES MATIÈRES SOLIDES EN SUSPENSION PRÉSENTES DANS LES EAUX DE RUISSELLEMENT PLUVIAL

M. Desbordes, E. Servat

Laboratoire d'Hydrologie Mathématique, U.S.T.L., 34060 — MONTPELLIER Cédex — France

Résumé

Pour diverses raisons, il paraît légitime de s'intéresser au polluant particulier que représentent les matières en suspension (MES), (elles sont responsables du colmatage des fonds et des berges, de la baisse de l'activité photosynthétique, de dépôts dans les réseaux, etc...). Résoudre les problèmes qui y sont attachés passe par la mise au point d'une méthodologie appropriée permettant d'obtenir des échantillons de bonne qualité. On décrit ici la chaîne de mesures telle qu'on la conçoit dans les meilleures conditions pour chacune des étapes du «cycle» des MES: production, accumulation, entraînement en surface, transport dans les réseaux. Il apparaît cependant que, préalablement à toute campagne de mesure, il serait nécessaire de s'intéresser à la nature des MES transportées et à leur comportement (existence de gradients de la concentration par exemple). Les propositions faites dans le cadre de cette étude ont pour objectif d'améliorer la qualité des données eu égard au large fossé qui existe entre la nature des informations recueillies et la puissance des outils (mathématiques et informatiques) dont on dispose pour les analyser.

Abstract

For many reasons it can be right to be interested in the specific pollutant that are total suspended solids (TSS) (they are responsible for the choke of beds and banks, for the photosynthesis drop, for the choke of pipes, etc...). To solve these problems the solution could be to establish a well fitted methodology to achieve good quality samples. The measures have been described, for what would be the best conditions, for each of the TSS «cycle» stages: production, accumulation, surface transport, sewers transport. But before any measure campaign it seems that it would be necessary to look over transported TSS nature and behaviour (concentration rates for example). Propositions made in this study aim to improve data quality because of the important difference that exists between collected data nature and tools power (mathematical and automatic) that can be used to analyse them.

Définition des objectifs

L'impact des Matières en Suspension (MES) du ruissellement pluvial urbain sur le milieu récepteur et les problèmes qu'elles posent aux gestionnaires de réseaux ne sont en rien négligeables.

Les MES sont responsables du colmatage des fonds et des berges; leur présence en concentrations élevées entraîne une baisse de l'activité photosynthétique. Un grand nombre de polluants et de toxiques fixés sur les MES, par adsorption ou par liaison électrostatique, sont véhiculés et relâchés dans le milieu récepteur, pouvant occasionner ainsi des dommages importants.

La présence de particules dans les réseaux conduit à bon nombre de problèmes: colmatage des canalisations, réduction de la capacité hydraulique des collecteurs due à l'augmentation de la rugosité des parois, diminution des sections d'écoulement, etc...

L'intérêt d'une étude expérimentale portant essentiellement sur les Matières en Suspension paraît donc évident.

Or, à notre connaissance, la grande majorité, sinon la totalité, des campagnes de mesures réalisées jusqu'à présent avaient pour objectif l'évaluation simultanée de plusieurs paramètres de pollution. C'était le cas, notamment, de la campagne nationale française menée sur quatre bassins versants expérimentaux (J.C. HEMAIN, 1983). Une approche de ce type convient à une évaluation globale du phénomène de pollution des eaux de ruissellement pluvial urbain, mais ne convient pas lorsqu'il s'agit de s'attaquer aux problèmes posés par un type de polluant particulier tel que les MES.

Il faut donc, dans ce cas, définir une méthodologie spécifique. Une bonne connaissance d'un phénomène passe par son évaluation au cours des différentes étapes du «cycle» qui le caractérise.

Dans les meilleures conditions, on chercherait donc à atteindre, par le biais de la mesure, la production des MES, leur entraînement par la pluie à la surface des bassins versants, leur transport dans les réseaux et leur rejet dans le milieu récepteur.

Bien comprendre comment réagissent les matières en suspension aux caractéristiques pluviométriques et débitométriques des averses auxquelles elles sont soumises passe par une série de mesures sur un bassin versant dont le réseau ne comporte pas de singularités.

Cependant, les collecteurs sont très souvent équipés d'ouvrages particuliers (puisards de rue, chambres à sable, bassins de décantation, etc...) dont le fonctionnement au regard des MES est une des préoccupations des gestionnaires.

res de réseaux. Supprimer l'un des deux aspects du problème reviendrait à n'avoir qu'une connaissance partielle du phénomène.

Proposition d'une méthodologie

Etude du «cycle» des MES

La procédure que l'on retiendrait dans le meilleur des cas consisterait à :

- équiper au moins N bassins dans un même site urbain si N est le nombre de types d'occupation des sols étudiés, afin d'analyser les phénomènes pour une même chronologie de pluies et d'épisodes secs;
- équiper au moins N autres bassins dans un site différent pour mettre en évidence une éventuelle influence climatique.

L'équipement de ces bassins devrait permettre la réalisation de mesures au niveau des différentes étapes que sont la production, l'accumulation, l'entraînement, le transport en réseau et le rejet des MES dans le milieu naturel (E. SERVAT, 1984). Les bassins versants sélectionnés devront satisfaire à un certain nombre de contraintes destinées à éviter tout apport extérieur au «cycle» des MES (J.C. HEMAIN, 1980).

On s'efforcera donc de choisir des bassins versants (B.V.):

- sans activité polluante occasionnelle,
- sans chantier de terrassement,
- sans pollution atmosphérique spécifique (proximité d'une usine très polluante par exemple),
- sans nettoyage des rues.

Ajoutons, en outre, qu'en fonction de leur taille, les B.V. devront être équipés d'un nombre de pluviographes suffisant pour prendre en compte la répartition spatiale des pluies.

Etude du fonctionnement des singularités au regard des MES

Une première approche peut être la réalisation des mesures en entrée et en sortie des ouvrages ou des singularités concernées. Elles devront s'étendre sur une durée suffisamment longue pour être représentative au niveau pluviométrique.

Cependant, ces résultats seraient généralisables si les modes de fonctionnement hydraulique internes étaient semblables. Ce n'est pas le cas, il faudra donc s'attacher également à mieux les définir.

La chaîne de mesures

Conformément à la méthodologie définie, on envisagera d'une part les mesures à réaliser au niveau des différentes étapes du «cycle» des MES et d'autre part celles à entreprendre pour étudier les phénomènes dans les singularités.

Au niveau des différentes étapes du «cycle» il y a, d'une part, les mesures à effectuer en surface des bassins versants et, d'autre part, celles qui concernent le transport dans les collecteurs.

Pour ce qui est des premières, l'importance de l'intensité pluviométrique sur de courtes durées ayant été établie (E. SERVAT, 1984), il convient d'utiliser des pluviographes qui soient en mesure de rendre compte du caractère agressif de la pluie. La figure 1 obtenue à partir d'un appareil mis au point par A. AZOULAY et al. (1979) montre que pour un pas de temps de cinq minutes, la zone d'intensité moyenne maximale (I_{max5}) ne comprend pas la pointe d'intensité la plus élevée, et ne rend que très peu compte de l'intensité

atteinte durant ce laps de temps. Or, dans le cadre de la campagne de mesure expérimentale française, par exemple, la période d'enregistrement de l'intensité moyenne maximale la plus courte était de cinq minutes.

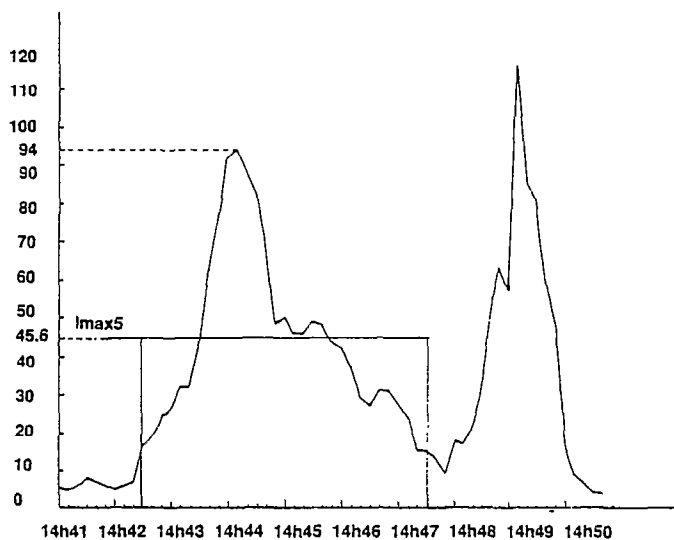


Figure 1. Intensités relevées à Issy-les-Moulineaux le 2/9/79. Comparaison entre l'intensité sur un faible pas de temps d'intégration et sur une durée de cinq minutes.

L'essentiel des sources de pollution n'est pas directement accessible à la mesure (érosion des surfaces perméables ou imperméables, trafic routier, rejets de déchets, etc...). On peut, cependant, évaluer la contribution de l'atmosphère, en séparant retombées sèches et pollution entraînée par la pluie au cours des averses. C'est l'objet de l'appareillage décrit dans la figure 2.

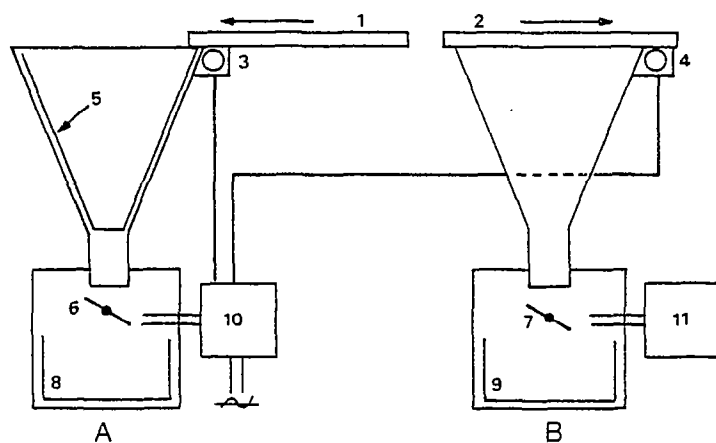


Figure 2. Mesure de la qualité des précipitations «sèches» et «humides».

- (a) Pluviographe «sec»
- (b) Pluviographe «humide»
- (1) et (2) Couvercles
- (3) et (4) Mécanismes d'entraînement de (1) et (2)
- (5) Dispositif de piégeage électrostatique des précipitations sèches
- (6) et (7) Augets basculeurs
- (8) et (9) Récipients [lavage eau distillée pour (a), pluie pour (b)]
- (10) Commande (3) et (4) asservie à (6) [hauteur donnée pendant une durée donnée]. Un système de relais chronométrique relié à (11) pourrait remettre le dispositif à zéro (a) ouvert, (b) fermé.
- (11) Enregistreur de pluie

L'accumulation des particules à la surface est une étape difficile à atteindre par la mesure. D.G. SHAHEEN (1975) a montré que les différentes techniques utilisées étaient assez peu efficaces.

La mesure des matières en suspension entraînées par le ruissellement de surface est, dans l'état actuel des choses, le seul moyen d'approcher globalement plusieurs étapes du «cycle» des MES : production, accumulation et entraînement en surface.

Nous proposons donc d'équiper un certain nombre d'ava-loirs de rues sur un même bassin versant, à l'aide du dispositif décrit dans la figure 3 qui permet de prendre en compte la mesure du débit. Les observations qui en découlent seront représentatives d'une petite partie du B.V., a priori homogène, et en tant que telles elles peuvent apporter des informations intéressantes en ce qui concerne le comportement de petites unités urbaines au regard des processus de production et d'accumulation des MES.

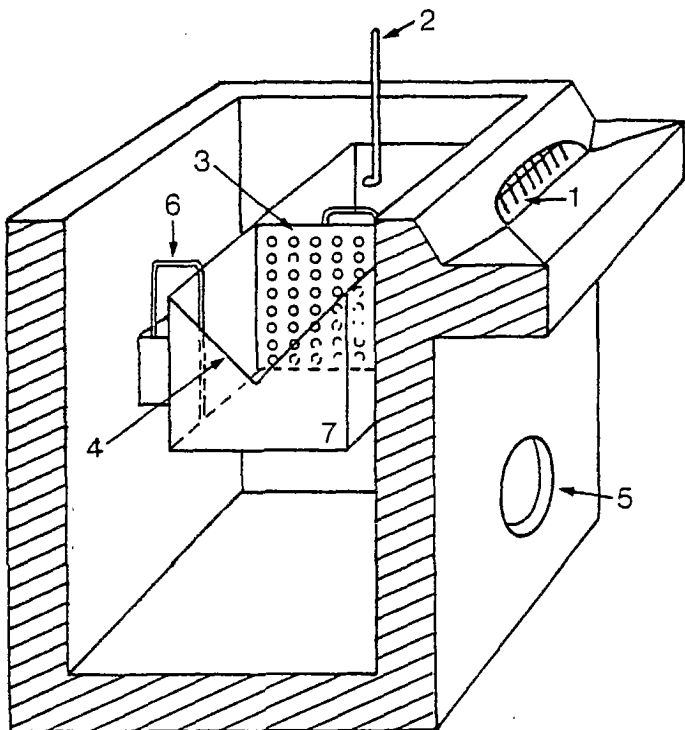


Figure 3. Principe d'échantillonnage dans un avaloir.

- (1) avaloir (éventuellement muni d'une grille)
- (2) crépine d'échantillonneur automatique (sur trottoir)
- (3) grille de tranquillisation escamotable
- (4) déversoir triangulaire
- (5) vers l'égout
- (6) sonde de mesure de niveau d'eau
- (7) bac de mesure fixé dans l'avaloir

Les mesures effectuées au sein des collecteurs sont d'une autre nature. Mieux connues et réalisées depuis fort longtemps, elles se heurtent à d'autres problèmes. En effet, si de telles mesures peuvent paraître simples dans le cas de paramètres à l'état dissous, elles sont plus complexes lorsqu'il s'agit d'échantillonner des particules solides inorganiques. Les types de transport des matières en suspension sont divers (charriage, saltation, suspension) et les échantillonneurs classiques ne sont pas toujours bien adaptés à ces cas particuliers, d'autant plus que l'existence d'éventuels gradients de concentration n'est généralement pas prise en compte.

On peut étudier le phénomène d'entraînement des particules en termes énergétiques. C'est reprendre, alors, la démarche de VELIKANOV (V. MILISIC, 1978) qui consiste à poser qu'un écoulement dont les caractéristiques hydrauliques sont connues possède une capacité de transport précisément définie. Nous avons cherché à déterminer le comportement des MES en fonction de leur répartition granulométrique pour diverses conditions d'écoulement. Notre objectif était de mieux cerner les cas pour lesquels des phénomènes de sédimentation avaient pu se produire, mettant ainsi en doute la représentativité des échantillons prélevés.

Les simulations effectuées l'ont été à partir de deux hypothèses granulométriques différentes (Tableau 1). La première d'entre elles est celle qui se rapproche le plus de ce qui semblerait être la granulométrie des MES du ruissellement pluvial (près de 50 % des particules de dimension inférieure à 50 μ). Le comportement de ces deux distributions granulométriques a été analysé pour différentes valeurs de pentes, de diamètres des collecteurs et de couples «vitesse-débit» dans le cas de concentrations en particules variant de 0.1 g/l à 1.5 g/l.

Les conditions hydrauliques de l'écoulement permettent de définir 3 situations (figure 4):

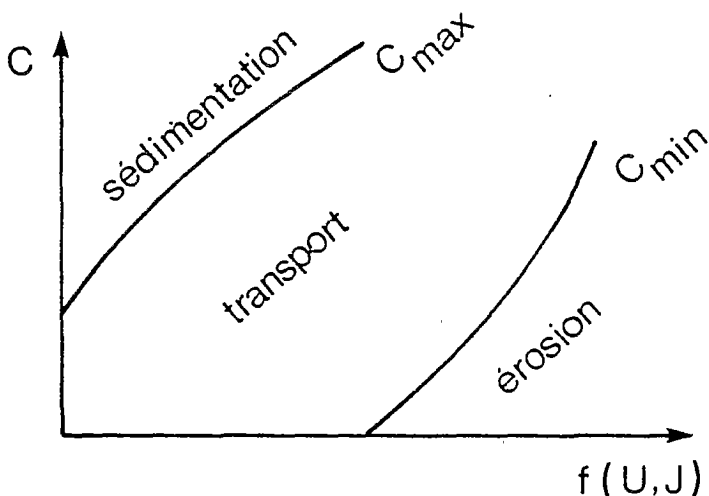


Figure 4. Courbe donnant les trois scénarios possibles en fonction des conditions d'écoulement.

- Erosion: l'énergie fournie par l'écoulement autorise le transport des MES et érode les dépôts existants s'il y en a et s'ils n'ont pas changé d'état lors de la mise à sec des collecteurs (induration des dépôts, transformations chimiques, etc...).
- Transport: l'énergie fournie par l'écoulement rend possible le transport des MES de l'effluent.
- Dépôt: les eaux sont trop chargées et l'énergie fournie par l'écoulement est insuffisante pour permettre le transport des MES.

Avec la première hypothèse granulométrique (E. SERVAT, 1984), — les tableaux 2 et 3 et les figures 5 et 6 sont données à titre d'exemple —, on observe des dépôts de MES dans le cas de faibles pentes (1‰ pour tous les types de collecteurs (du \varnothing 500 au \varnothing 2000).

(emplacements tableau 2 et figure 5 - tableau 3 et figure 6)

Le phénomène se produit pour des vitesses qui sont toujours inférieures à 1 m/s. Le tableau 4 montre que la concentration entraînant l'apparition des dépôts augmente avec la vitesse et le diamètre du collecteur.

Tableau 1 – Diamètre des particules (μ), % en masse, vitesse de chute (m/s), retenues pour des simulations avec le modèle de VELIKANOV

– Hypothèse 1

Diamètre des particules (μ)	14	22	29	38	46	55	68	90	150	500
% en masse	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Vitesse de chute en m/s	.00016	.00032	.00071	.00130	.00160	.0022	.0035	.0060	.0150	.062

– Hypothèse 2

Diamètre des particules (μ)	52	82	130	200	320	500	800	1300	1900	3250
% en masse	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Vitesse de chute en m/s	.002	.005	.012	.023	.042	.062	.090	.120	.155	.190

Tableau 2 – \varnothing 500: Résultats des simulations effectuées avec le modèle de VELIKANOV – 1ère hypothèse granulométrique.

Pente	Résultats de la simulation	
1 ‰	V = .315 m/s V = .470 m/s	Dépôts à partir de .5 g/l Dépôts à partir de 1 g/l
5 ‰	Erosion et donc transport pour toutes les situations, de 0.1 à 1.5 g/l.	
1 %	– idem –	
3 %	– idem –	

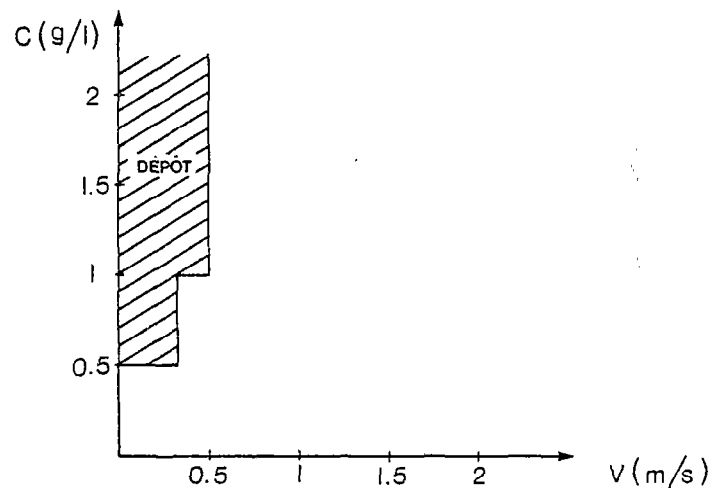


Figure 5. \varnothing 500: Tracés des simulations effectuées avec le modèle de VELIKANOV 1ère hypothèse granulométrique.

Tableau 3 – \varnothing 1500: Résultats des simulations effectuées avec le modèle de VELIKANOV – 1ère hypothèse granulométrique.

Pente	Résultats de la simulation	
1 ‰	V = .7 m/s	Transport à .1 g/l Dépôts à 1.5 g/l Erosion dans tous les autres cas
5 ‰	Erosion dans tous les cas	
1 %	– idem –	

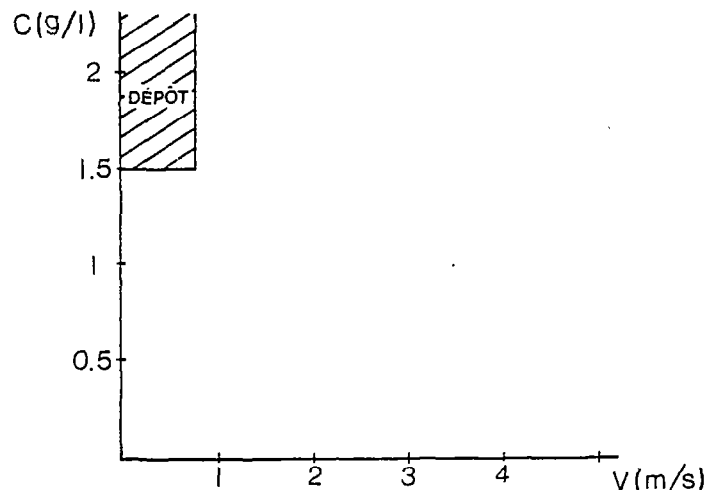


Figure 6. \varnothing 1500: Tracés des simulations effectuées avec le modèle de VELIKANOV 1ère hypothèse granulométrique.

Tableau 4 – Pente = 1 ‰ – Concentrations entraînant l'apparition de dépôts pour différentes vitesses. 1ère hypothèse granulométrique.

\varnothing 500	V = .315 m/s V = .470 m/s	Dépôts à partir de .5 g/l Dépôts à partir de 1 g/l
\varnothing 1000	V = .525 m/s V = .622 m/s	Dépôts à partir de .5 g/l Dépôts à partir de 1.5 g/l
\varnothing 1500	V = .700 m/s	Dépôts à partir de 1.5 g/l
\varnothing 2000	V = .900 m/s	Dépôts à partir de 1.5 g/l

Les autres situations correspondent à des phénomènes de transport et/ou d'érosion des matériaux solides. Les prélèvements effectués dans ces conditions peuvent donc être considérés comme représentatifs, dans la mesure où l'appareillage, lui-même, permet un bon échantillonnage. On a calculé un ordre de grandeur des concentrations en MES qui peuvent être véhiculées dans le cas d'un faible taux de remplissage des collecteurs.

Les simulations réalisées correspondent à un rapport Débit réel/Débit à pleine section égal à 0.2. En dehors des écoulements à faible pente (1‰), on reste loin des capacités de transport maximales au sein des réseaux, et ce, même dans le cas d'événements entraînant de fortes concentrations en MES dans les eaux de ruissellement pluvial (E. SERVAT, 1984). Le tableau 5 est un exemple des résultats auxquels nous sommes arrivés.

**Tableau 5 – Ø 1000: Potentiel de transport dans le cas d'un faible taux de remplissage des collecteurs ($Q/Q_{p.s.} = 0.2$).
Modèle de VELIKANOV.
1ère hypothèse granulométrique.**

Pente	Vitesse (m/s)	Concentration de transport possible (g/l)
5 ‰	1.125	7
1 ‰	1.580	20
3 ‰	2.850	120

Les essais réalisés à partir de la seconde hypothèse granulométrique mettent en évidence des dépôts plus fréquents que précédemment pour des pentes faibles et moyennes (1‰ et 5‰). Avec une telle granulométrie, comportant un pourcentage important de particules de grande taille (50 % sont supérieures à 400 µ), la totalité des matériaux présents en surface ne se retrouverait pas en suspension. Dans ce cas, l'échantillonnage ne serait que faiblement représentatif de la réalité. Néanmoins, une telle distribution granulométrique est relativement exceptionnelle et assez éloignée de ce qui caractérise habituellement le ruissellement pluvial.

Partant de ces résultats, les prochaines études portant sur les matières en suspension devraient s'attacher à vérifier l'existence ou non de gradients de concentration. Dans cette optique, on peut imaginer le dispositif expérimental suivant, utilisant des échantillonneurs classiques par aspiration:

- installation de trois crépines sur deux verticales, afin d'opérer des prélèvements à différentes profondeurs;
- déclenchement simultané des opérations de prélèvement,
- analyse granulométrique des différents échantillons.

L'installation d'un piège à sédiments doit, quant à lui, permettre de recueillir des informations concernant les éléments les plus grossiers, transportés par charriage ou par saltation.

De l'analyse de différentes études (M. CATHELAIN et J.P. DEMIAUTTE, 1980), (P.E. SHELLEY, 1975), il apparaît également qu'il est indispensable de disposer plusieurs crépines au sein de l'écoulement pour améliorer la représentativité de l'échantillon prélevé.

En ce qui concerne les mesures dans les singularités, on distinguera d'une part les ouvrages particuliers des réseaux et d'autre part les singularités dues aux réseaux.

Dans le premier cas, le dépôt de MES est l'objectif souhaité. Pour étudier le rendement de dispositifs tels que

décanteurs, chambres à sable, etc..., il convient de procéder à une série de mesures, en amont et en aval, afin d'établir des bilans massiques et de déterminer l'efficacité de ces ouvrages. Sur un plan qualitatif, on procèdera à des analyses granulométriques. La comparaison des résultats obtenus aux courbes déterminées pour les MES transportées dans les réseaux devrait apporter des informations intéressantes quant au fonctionnement des dispositifs particuliers placés sur les réseaux.

Le second cas concerne des zones de fluides à faibles vitesses susceptibles d'entraîner le dépôt de particules gênant l'écoulement. La compréhension et la suppression de ces dépôts résultent de l'analyse du problème en termes purement hydrauliques.

Conclusion

Comme nous l'avons dit, jusqu'à présent les campagnes de mesure réalisées dans le but d'évaluer la pollution des eaux de ruissellement ont cherché à améliorer notre connaissance globale du phénomène. Dans ce cadre, les différents polluants ont été analysés à partir d'échantillons prélevés selon un protocole unique.

Néanmoins, les matières en suspension ont, elles, un comportement spécifique dû à leur granulométrie et à leurs modes de transport (charriage, saltation ou suspension). La maîtrise de ce type de pollution passe, dans un premier temps, par une procédure d'échantillonnage bien adaptée et permettant d'analyser les phénomènes à chacune des étapes du «cycle» des MES.

On a vu que les retombées atmosphériques (sèches ou entraînées par la pluie) constituaient pratiquement, la seule source de pollution directement accessible par la mesure (aux erreurs près liées à l'appareillage, aux phénomènes de turbulence atmosphérique, etc...). Quelques mesures de ce type ont été effectuées, dans le cadre de la campagne de mesure nationale, qui ont montré que cet apport de MES était à peu près négligeable. On peut, néanmoins, souhaiter que des analyses de ce type soient réalisées régulièrement durant les campagnes de mesure.

De même, des analyses de dépôt de surface et d'eaux prélevées à l'entrée des réseaux sont de nature à améliorer notre connaissance du phénomène «d'accumulation - entraînement» des MES. Ceci va de pair avec l'installation en surface de pluviographes à très faibles temps d'intégration et d'appareils de mesure de variables climatologiques qui jouent, à n'en pas douter, un rôle important sur la structure plus ou moins agrégée des dépôts (vent, humidité).

Il paraît nécessaire de faire précéder l'échantillonnage dans les collecteurs de certaines études relatives à la nature des MES transportées et à leur comportement : analyses granulométriques, existence éventuelle de gradients de concentration, etc... Une telle étude préalable permettrait de définir le modèle de préleveur le mieux adapté et la part d'information qui nous échappe pour des conditions d'écoulement données (dépôts partiels en cas de collecteurs à faibles pentes, tri hydraulique lorsque la vitesse d'écoulement diminue, etc...).

L'application d'un protocole comme celui-ci dans le cadre d'une campagne de mesure portant sur des bassins versants soigneusement sélectionnés entraînerait l'obtention de mesures plus représentatives de la réalité.

Ceci dit, d'après les résultats des simulations effectuées à partir du modèle de VELIKANOV, il existe un grand nombre de cas où les mesures peuvent être jugées représentatives bien qu'elles aient été effectuées à l'aide d'un seul préleveur

et sans analyse préalable (granulométrie, gradients de concentration, etc...). Malgré cela, et afin de pouvoir arriver à de meilleurs résultats, notamment en termes de modélisation des phénomènes, il paraît important de désigner comme un objectif prioritaire l'amélioration de la qualité des mesures. Ceci d'autant plus qu'il existe, désormais, un large fossé entre les techniques de mesure utilisées et la puissance et l'importance des outils (mathématiques et informatiques) dont on dispose pour analyser et traiter les données.

Références bibliographiques

AZOULAY A., BESCOND R., PUECH J.L. (1979).
«Etude d'un pluviomètre à faible temps d'intégration». - C.N.E.T., Note Technique NT/TCR/APH/68

CATHELAIN M., DEMIAUTTE J.P. (1980).
«Etude bibliographique des preleveurs pour la mesure de la qualité des eaux de ruissellement». — C.E.T.E. Nord Picardie, Lab. Rég. St Quentin, Rapport de Recherche P.V. 80692.

HEMAIN J.C. (1980).
«Approche méthodologique pour l'étude de la pollution du ruissellement pluvial urbain». - Thèse Docteur-Ingénieur, U.S.T.L. Montpellier.

HEMAIN J.C. (1983):
«Mesure de la pollution du ruissellement pluvial urbain. Rapport 1: Suivi et bilan de la campagne expérimentale». Laboratoire d'Hydrologie Mathématique, Rapport de Recherche 21/83, U.S.T.L. Montpellier.

MILISIC V. (1976).
«Contribution à l'analyse du phénomène de suspension». Thèse, Université P. Sabatier, Toulouse.

SERVAT E. (1984). - «Contribution à l'étude des matières en suspension du ruissellement pluvial à l'échelle d'un petit bassin versant urbain». Thèse Docteur-Ingénieur, U.S.T.L. Montpellier.

SHAHEEN D.G. (1975).
«Contribution of urban roadway usage to water pollution». - E.P.A. Report R2 - 73 - 261.

SHELLEY P.E. (1975). - «Design and testing of a prototype automatic sewer sampling system». - E.P.A. Report R2 - 75.

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	NAUREPAS	LES ULIS	AIX-ZUP	AIX-NORD
Surface (ha)	26,7	43,1	25,6	92
Pente moyenne (Z)	0,5	0,55	2,9	6,5
Imperméabilisation (Z)	60	42	78	35
Habitat individuel (Z de la surface totale)	70	0	0	30
Habitat collectif (Z 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 (ng/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.

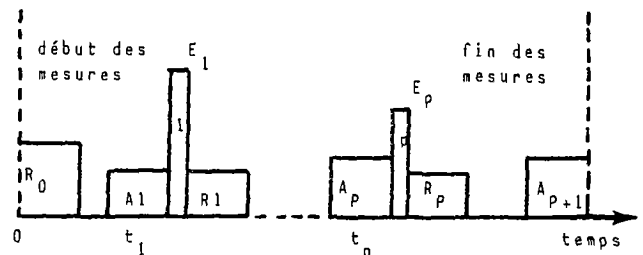


Figure 1
Schéma conceptuel de l'accumulation et du transport des M.E.S. avec :

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 :

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

et en sommant :

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

Ayant 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 (m³)

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 , α , β , γ 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 , α , β et γ reportées dans le tableau 2 :

	AIX-TOUP	LES ULIES	MAUREPAS
K	0.697	0.996	0.412
α	0.324	0.161	0.165
β	0.636	0.848	0.921
γ	0.307	0.421	0.332

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-TOUP	LES ULIES	MAUREPAS
Fonction critère	50.981	92.757	29.408
Ecart entre masses totales observées et calculées (%)	- 5.8 %	+ 5.3 %	- 13.0 % (+ 21.5 % 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	19 089
	(16 087 sans l'événement du 16.05.82)	(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.

FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN STORM DRAINAGE

TRANSPORT MODEL OVER URBAN CATCHMENT SURFACES REGARDING TSS, BOD5 AND COD

M. DESBORDES *, E. SERVAT **

* L.H.M. - Univ. Sciences- Place Eugène Bataillon - 34100 MONTPELLIER - FRANCE

** ORSTOM - Miniparc Bt. 2 - Rue de la Croix Verte - 34100 MONTPELLIER - FRANCE

SUMMARY : A modelling approach has been performed from the data collected within the context of the French national program on urban runoff pollution. Two transport models have been developed to simulate the total loads annually transported by runoff and the loads transported during each event. The reached accuracy level ($\pm 5\%$ to $\pm 10\%$ for the annual load and $\pm 10\%$ to $\pm 30\%$ for the observed events) appears satisfactory though such a modelization can always be improved.

INTRODUCTION

We propose here to develop a modelling approach for the surface transport of TSS, BOD5 and COD. It is directly derived from the objectives of the national monitoring program to determine estimates of transported pollutant mass over a long duration (about one year) and for a "space scale" which relates to small catchments (less than 50 ha). A conceptual procedure is proposed which is compatible with the representativeness of the sampling program and with the trends arising from the data analysis (SERVAT, 1984), (SERVAT, 1985).

CONCEPTUAL PROCEDURE

We needed to evaluate the pollution available mass for one of the developed transport models. Thus an accumulation model was developed, based on the following hypotheses :

- a constant production rate within a given time interval ;
- an initial mass of pollutant (stock) close to the final one on the surface of the catchment when considered over a long time period ;
- the transported mass during an event i is less than or equal to the available one, i.e. $E_i \leq M_{di}$.

Two transport modelling approaches have been tested. The first one considers that the available mass evaluated from the accumulation model is a bounding factor. The second one considers a two-level pollution stock on the catchment surface : a first level which is usually requested, and a second one, called "deep level", which is sometimes requested but which cannot be a bounding factor. In this case we do not need to evaluate the available mass. Further this available mass which takes place only in the first model, the chosen variables are the same in both cases and they proceed from data analysis ((DESBORDES and SERVAT, 1984) (SERVAT, 1985)). The maximum intensity within a short time interval, here five minutes ($I_{max 5}$), is representative of the rainfall "agressivity" and of its ability to stick the accumulated pollution off from the catchment surface. These pollutants potentially set going must be conveyed towards the catchment outlet. It is done through surface runoff taken into account as runoff volume (V_r).

ACCUMULATION MODEL

A linear pollutant accumulation model was selected on the above hypothesis. The accumulated mass is then taken to be proportional to the dry weather period : $A_i = Pr \cdot DTS_i$ in which

A_i = accumulated mass (kg) over catchment surface during dry weather period DTS_i (in time interval units) which separates rainfall events i and $i - 1$

Pr = pollutant production rate during a time interval (kg/time interval unit)

It was then possible to compute daily production rates for the catchments under consideration (SERVAT, 1984) :

TRANSPORT MODELS

Two types of transport models have been developed referring to two different concepts : the first one needs an evaluation of the pollutant available mass (the accumulation model will be used in this case) and the second one considers a two level pollution "stock" which can never be a bounding factor. In the first case the control variables are :

- available mass, M_d (kg)
- maximum intensity within a five minutes time interval, I_{max5} (mm/h)
- runoff volume, V_r (m³)

and the equation is given by :

$$E = K.M_d^\alpha.I_{max5}^\beta.V_r^\gamma$$

with E = transported mass during an event (kg)
 K, α, β, γ parameters peculiar to each catchment.

In the second case two control variables are sufficient, I_{max5} and V_r . The proposed equation is given by

$$E = K'I_{max5}^{\beta'}.V_r^{\gamma'}$$

with : E, I_{max5} and V_r = defined above
 K', β', γ' = parameters peculiar to each catchment.

Model parameters were identified using ROSENBROCK'S method (1960) based on the minimization of the sum of the square of the deviations between observed and computed values.

CONCLUSIONS

Using data from the national experimental measurement program, the modelling objective was to reproduce the total TSS, BOD₅, and COD loads for selected urban catchments. A two-step approach involving accumulation and transport was first performed. A linear accumulation model was chosen, which depends on a constant daily production rate and on the assumption that over a long time period the total mass produced will be removed. Simulation of pollution transport was achieved using a three variable model : $E = KM_d^\alpha I_{max5}^\beta V_r^\gamma$. The results are good in so far as the total transported mass can be reproduced with a $\pm 5\%$ to $\pm 10\%$ deviation. A one step approach was then performed to simulate pollution transport. In this case only two control variables were retained. This model is conceptually different because it assumes that available mass is not a limiting factor. Its formulation is : $E = K'I_{max5}^{\beta'} V_r^{\gamma'}$. The results are good enough since the total transported mass can also be reproduced with the same $\pm 5\%$ to $\pm 10\%$ deviation. For each pollutant and for each of the retained approaches, with respect to small events the reproduction of the observed masses is not very good, because the relative influence of one or another of the variables is not well known. For large scale events, the level of accuracy (from $\pm 10\%$ to $\pm 30\%$) seems to be very acceptable.

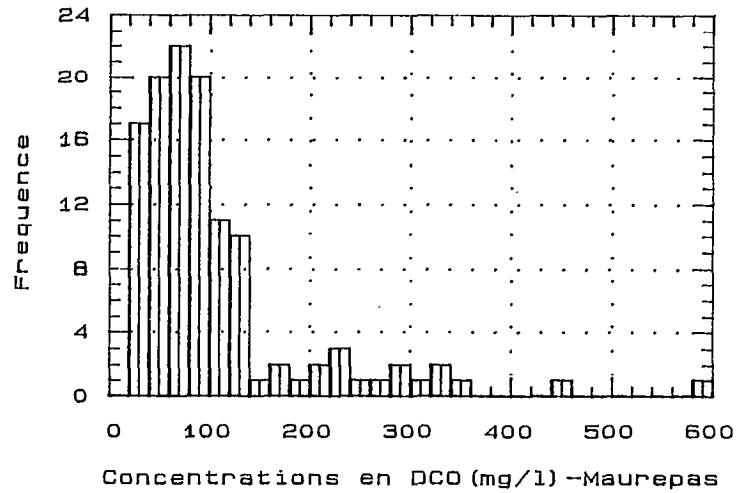
REFERENCES

- DESBORDES M., SERVAT E. (1984) - "Solids in urban runoff. Statistical analysis of french experimental data". Third Int. Cong. on Urban Storm Drainage - Göteborg - 4-8 June.
- ROSENBROCK H.H. (1960) - "An automatic method for finding the greatest or least value of a function". Computer Journal, Vol. 3, n° 3, pp. 175-184.
- SERVAT E. (1984) - "Contribution à l'étude des matières en suspension du ruissellement pluvial à l'échelle d'un petit bassin versant urbain". These Dr. Ing., Univ. des Sciences, Montpellier, France.
- SERVAT E. (1985) - "Etude de la DBO₅ et de la DCO du ruissellement pluvial urbain. Essai de modélisation". LHM - Univ. des Sciences, Montpellier, France - Note 11/85.

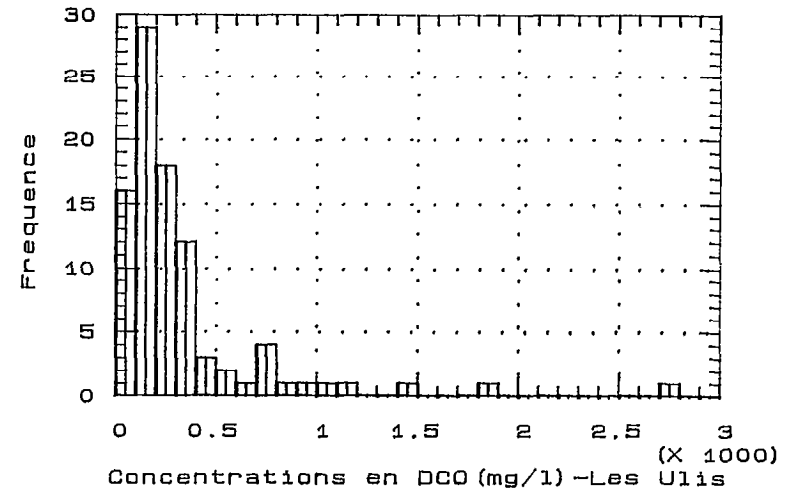
ANNEXE 2 :

Tracés des histogrammes de fréquences et des courbes de fréquences relatives cumulées.

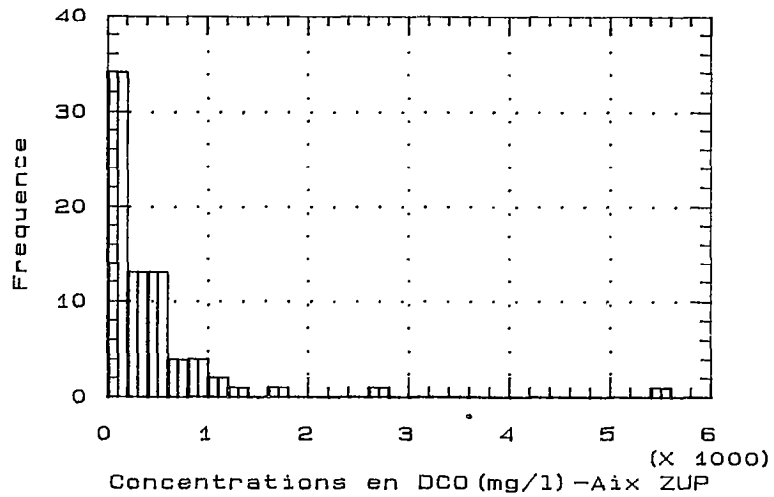
Histogramme des Frequences



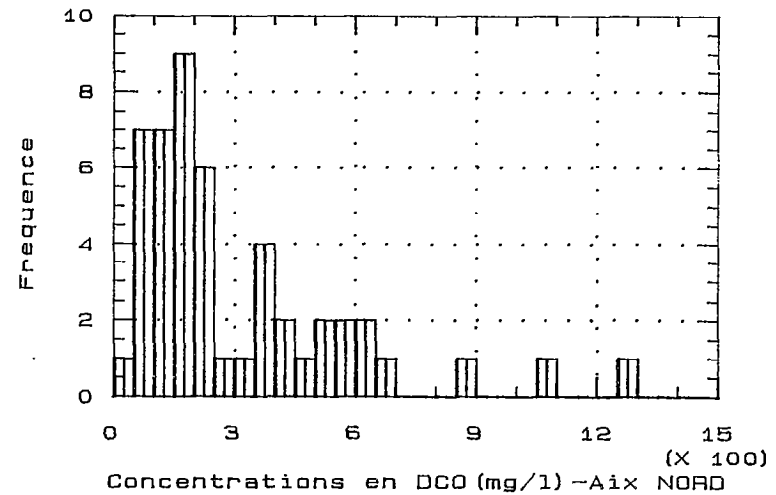
Histogramme des Frequences

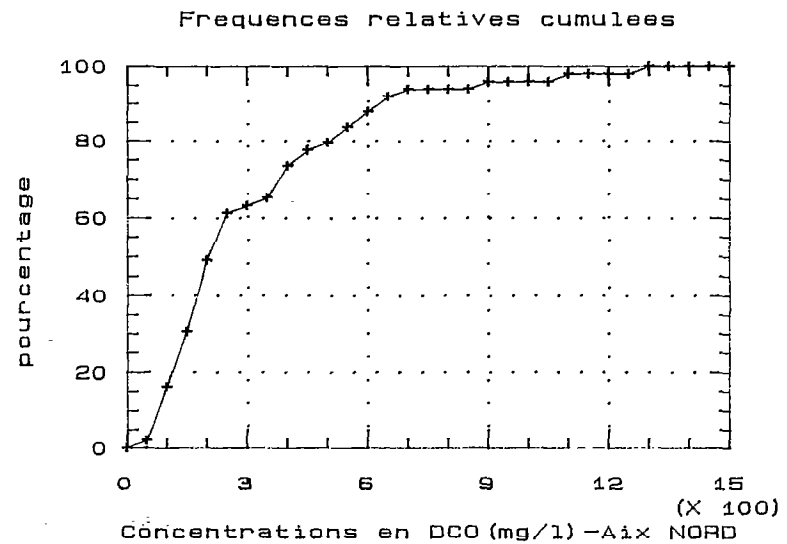
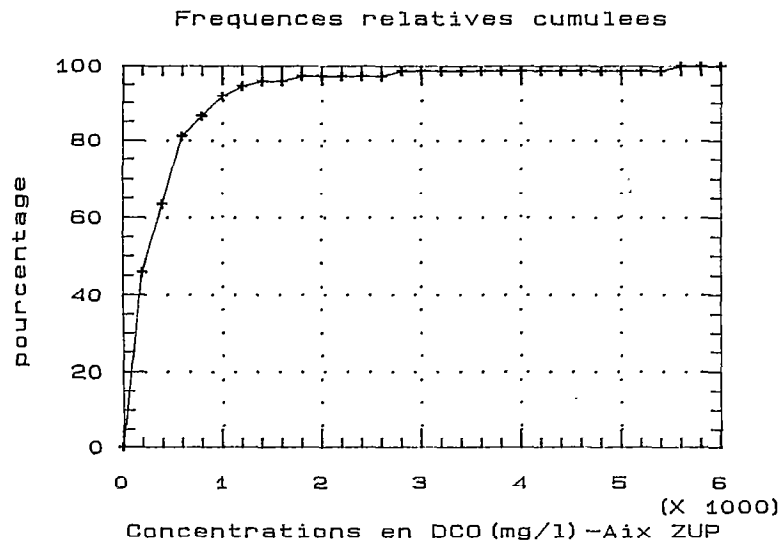
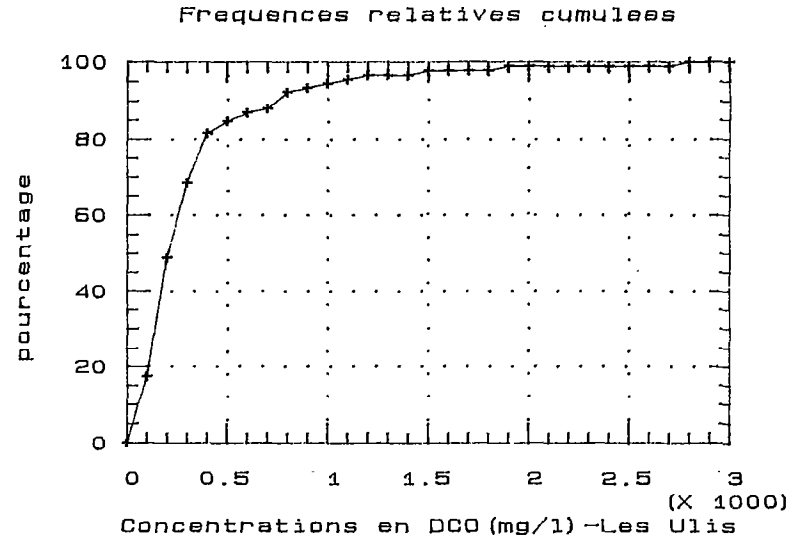
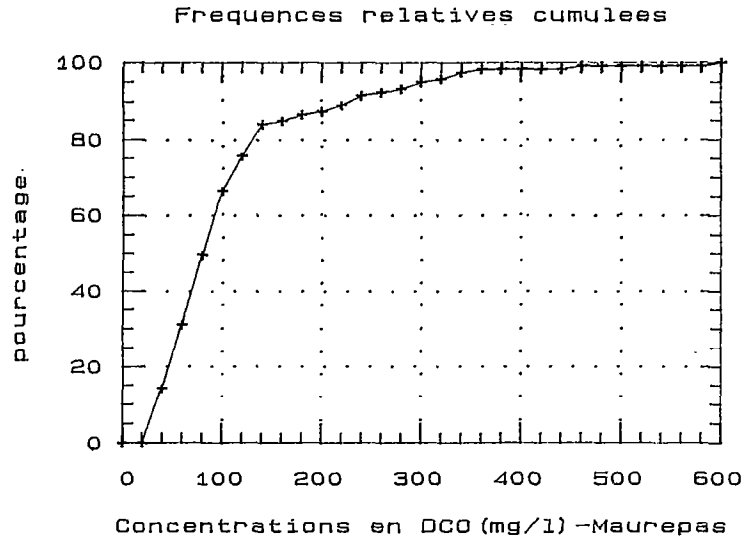


Histogramme des Frequences

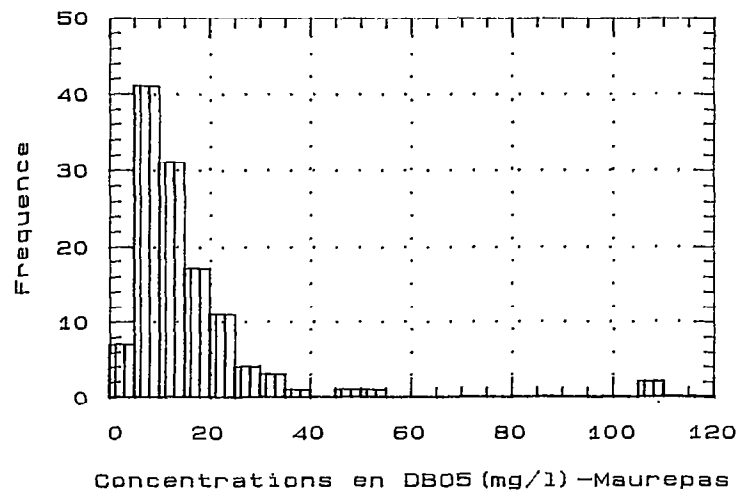


Histogramme des Frequences

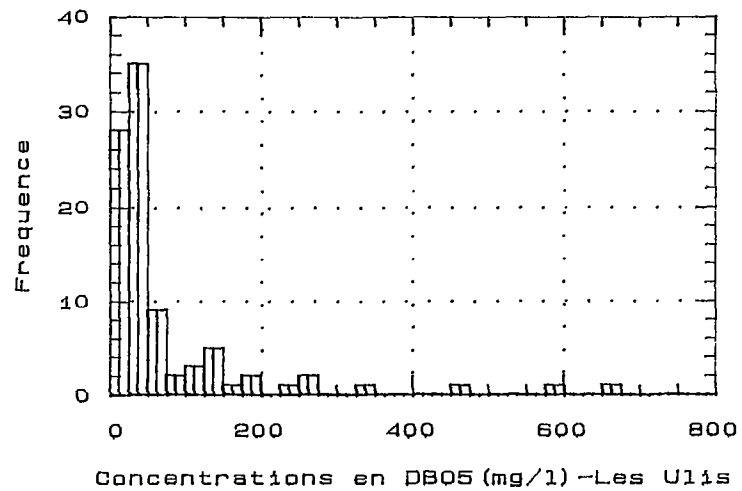




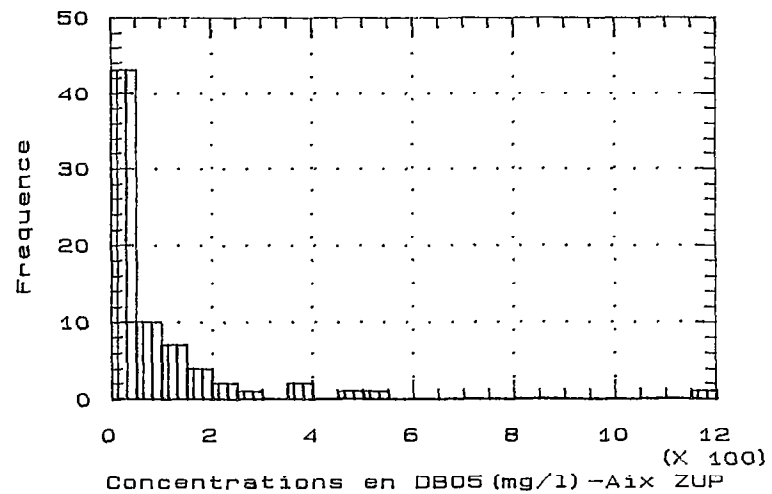
Histogramme des Frequences



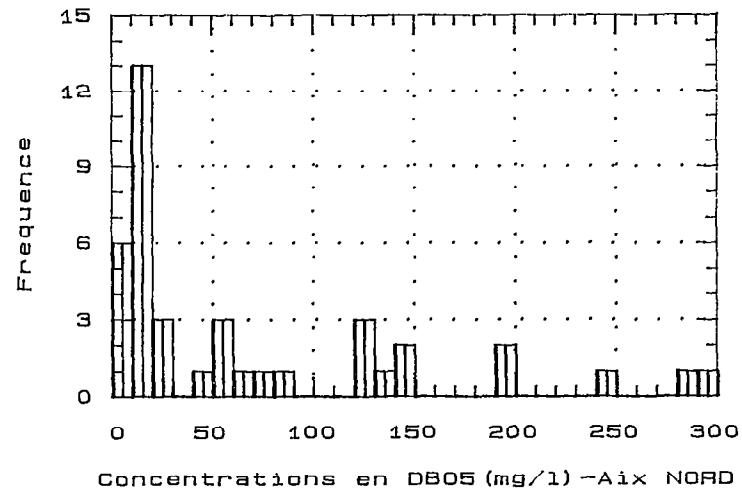
Histogramme des Frequences

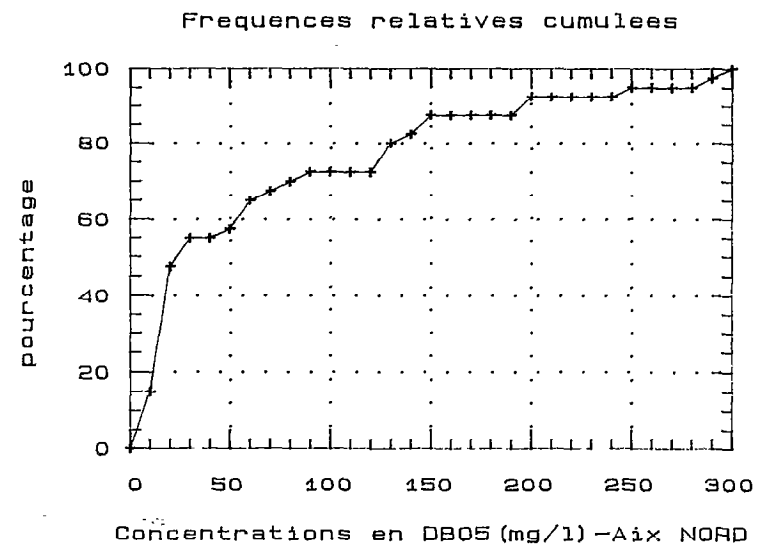
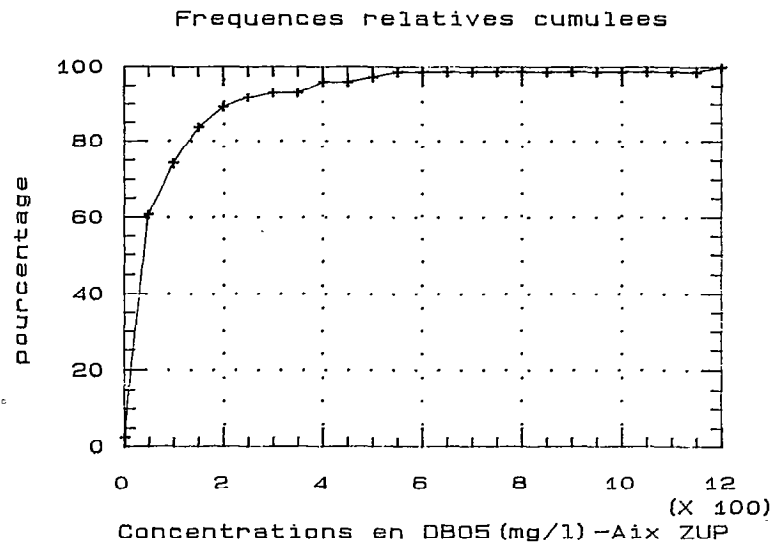
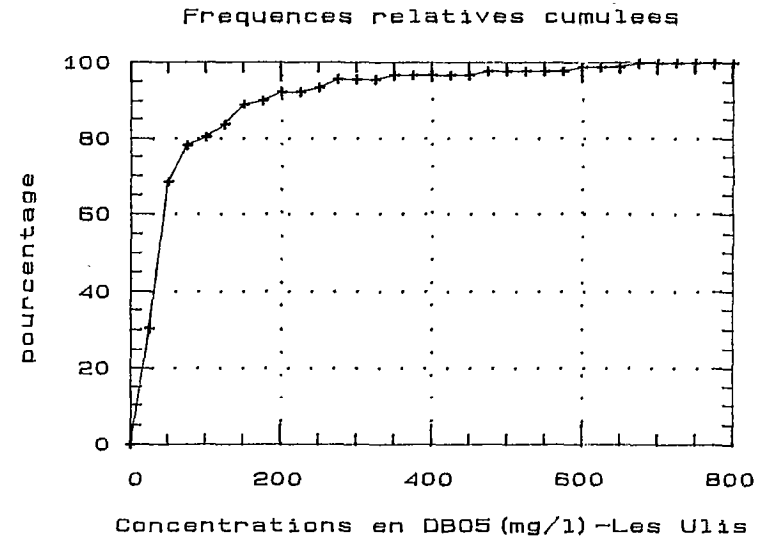
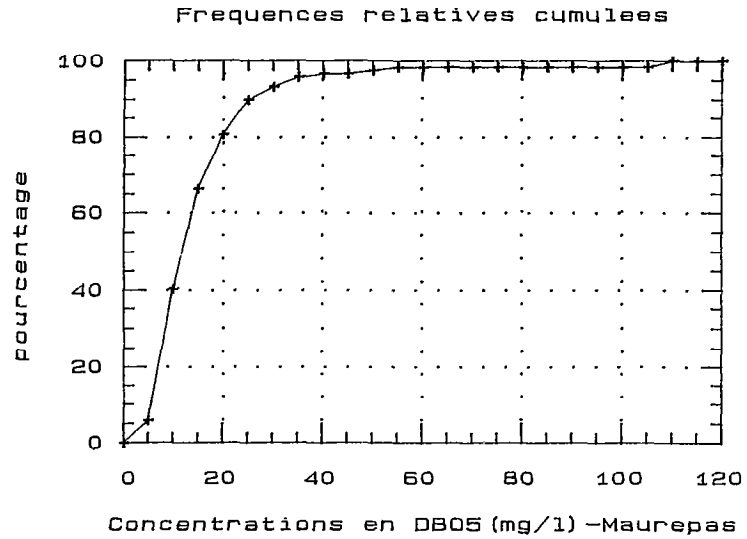


Histogramme des Frequences

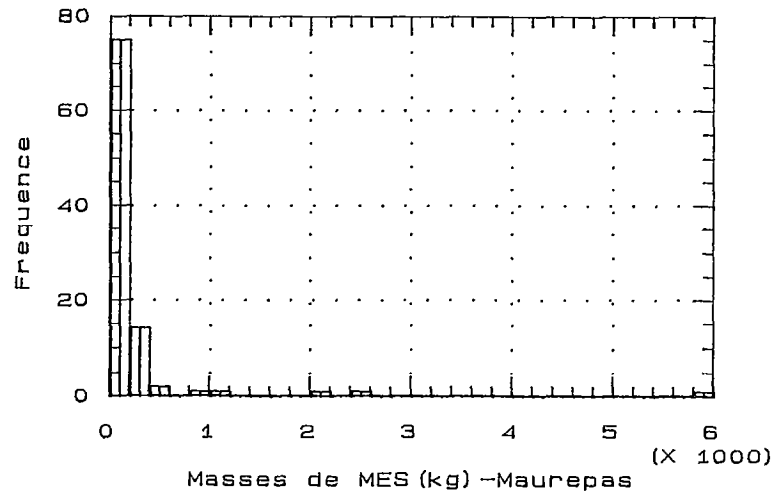


Histogramme des Frequences

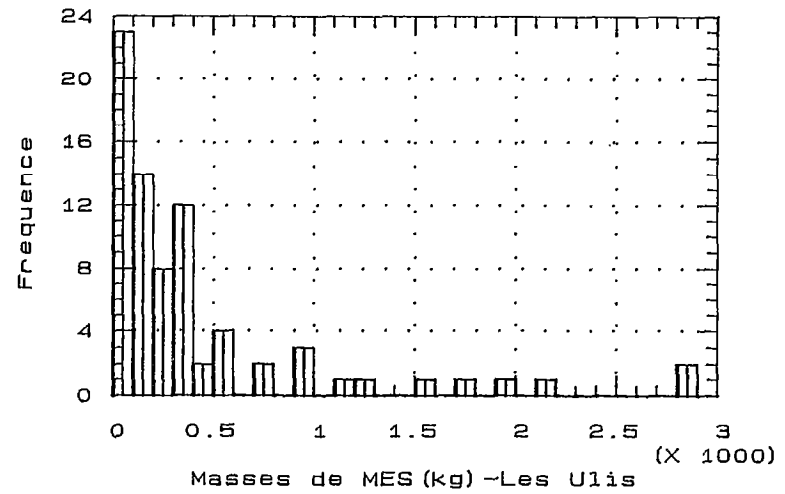




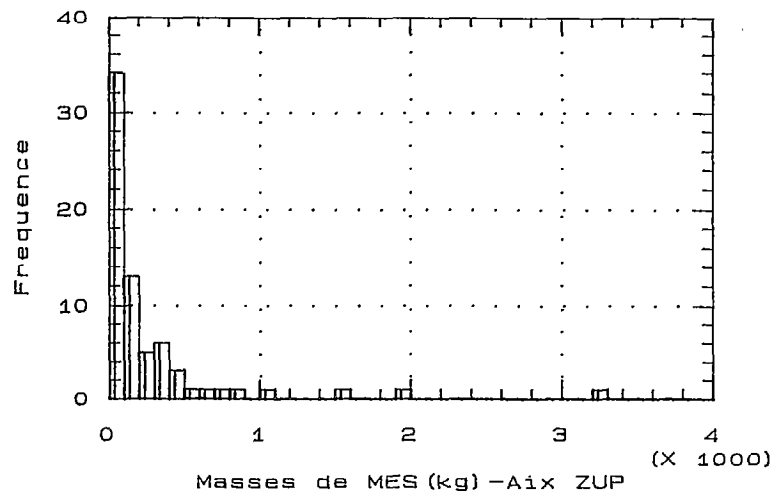
Histogramme des Frequences

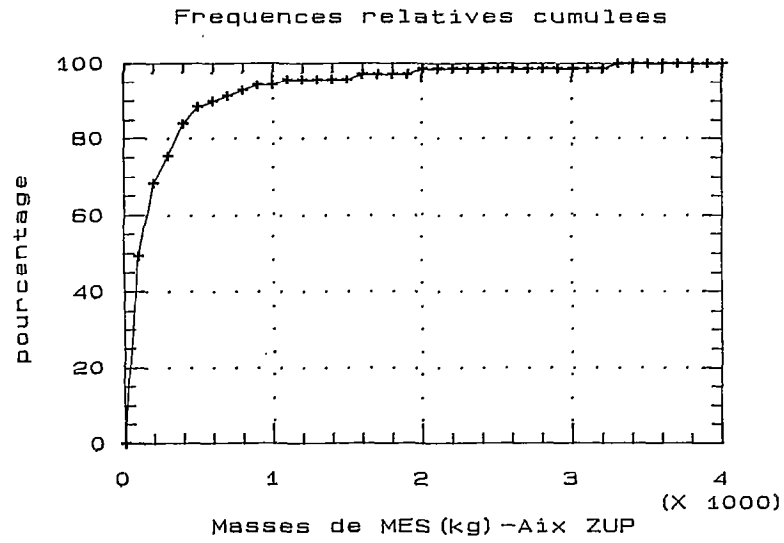
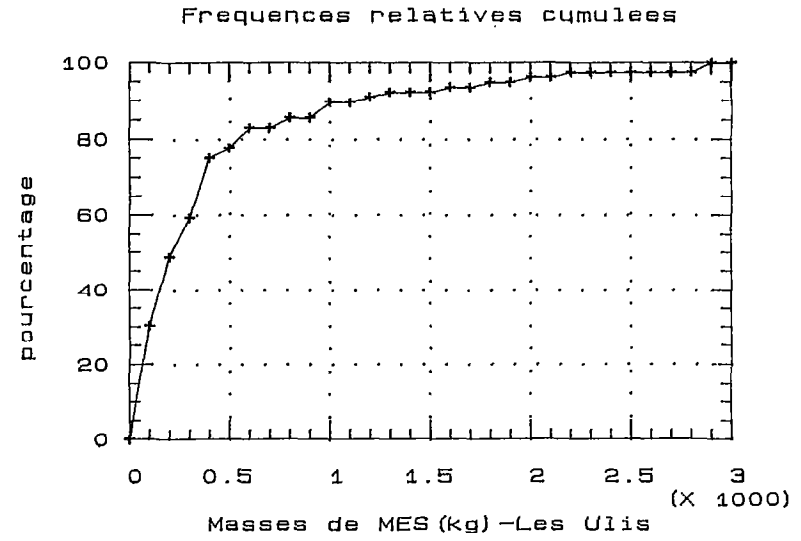
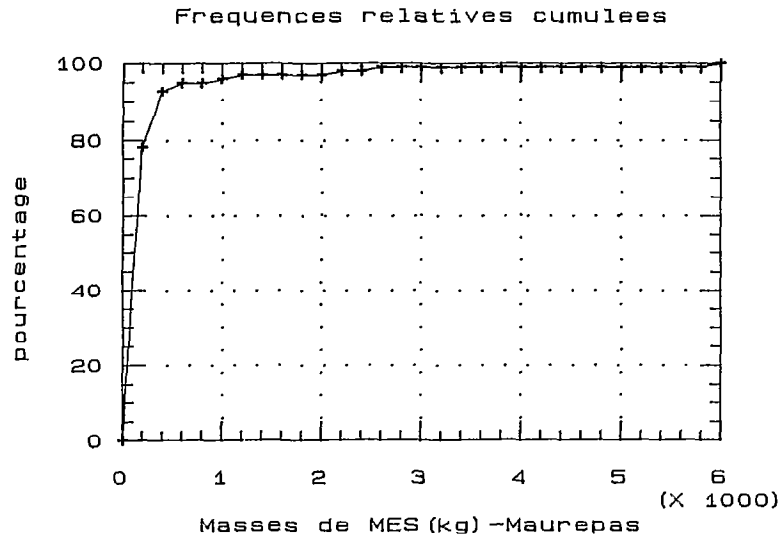


Histogramme des Frequences

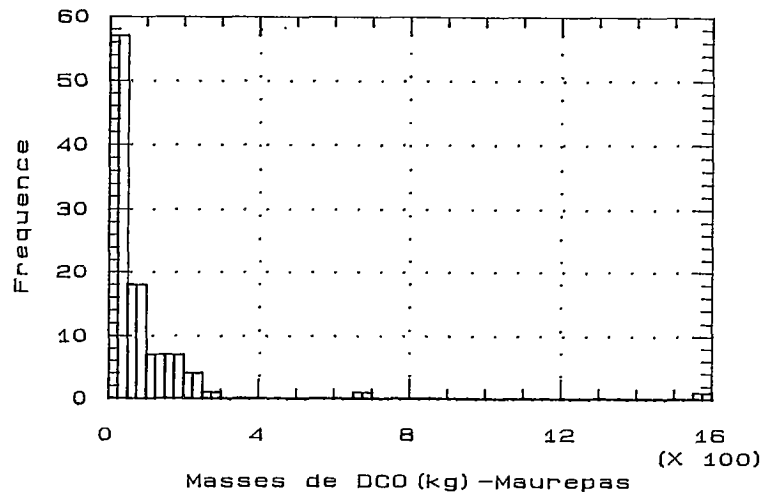


Histogramme des Frequences

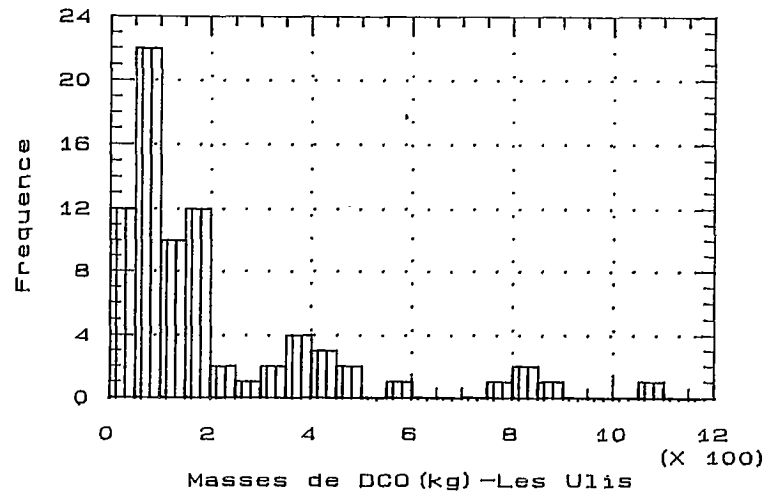




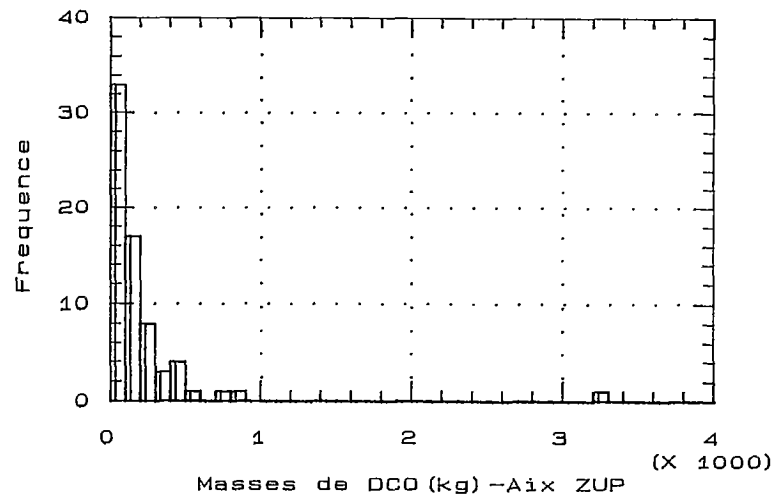
Histogramme des Frequences

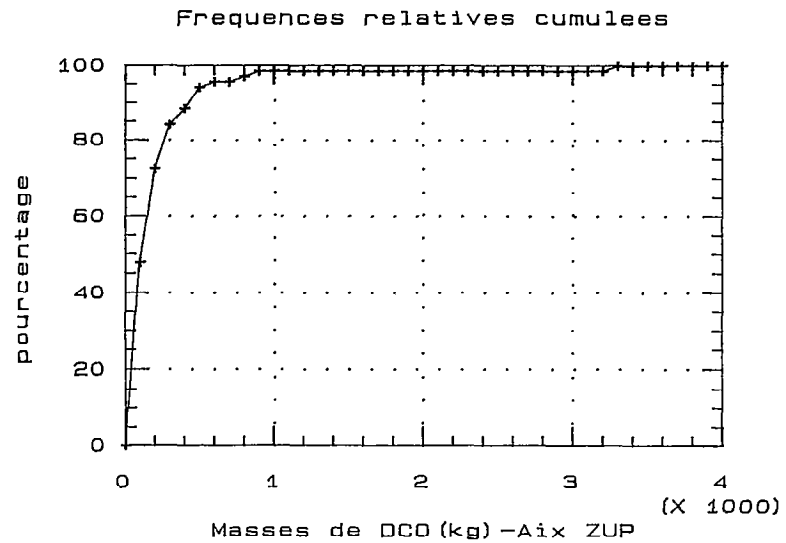
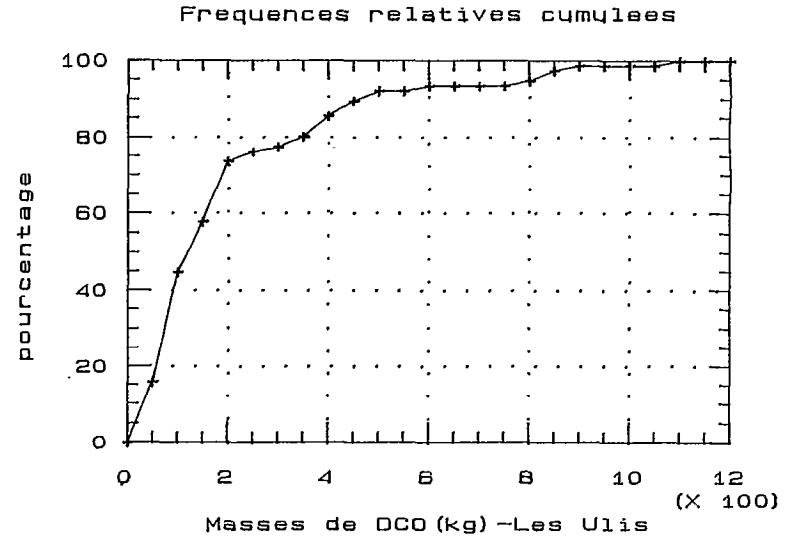
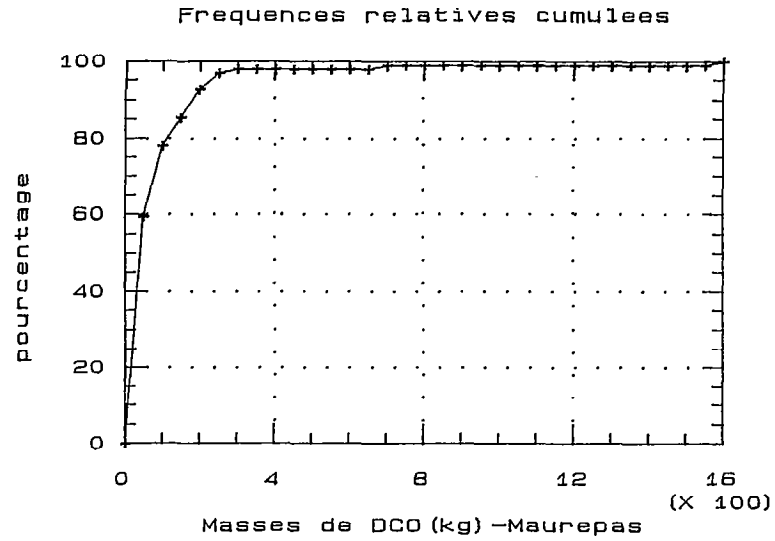


Histogramme des frequences

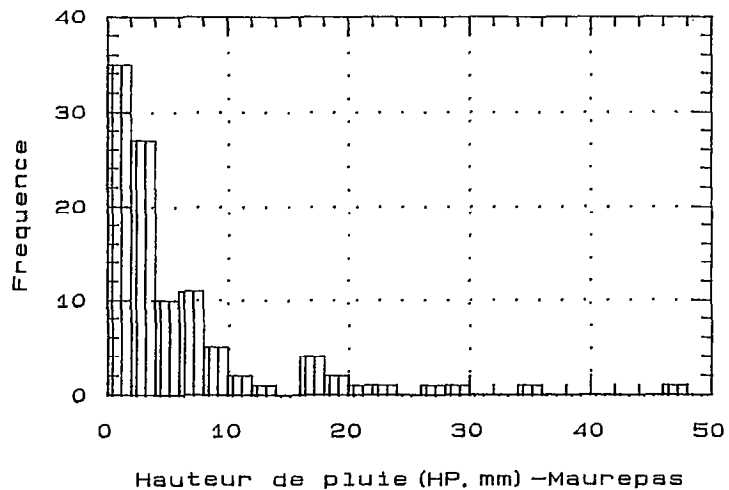


Histogramme des frequences

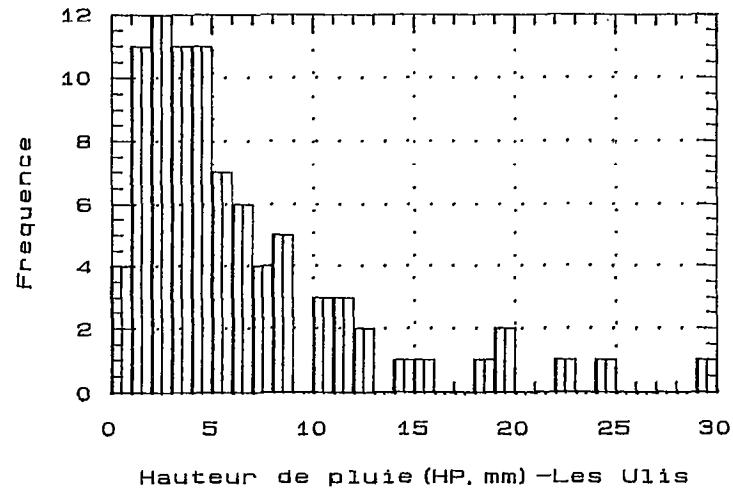




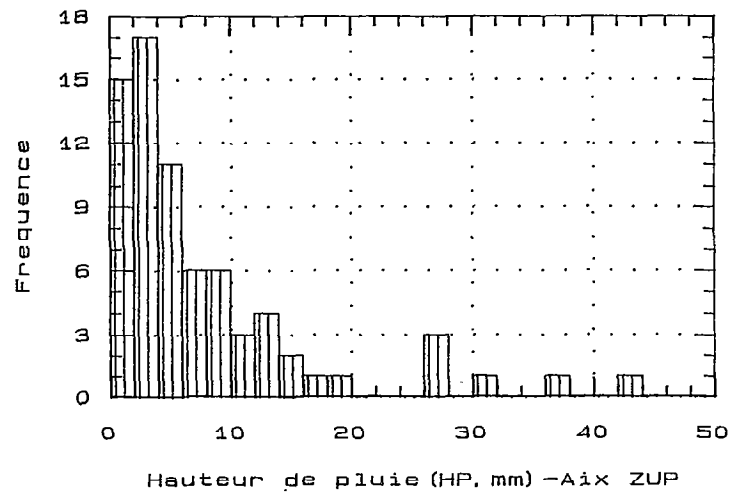
Histogramme des Frequences



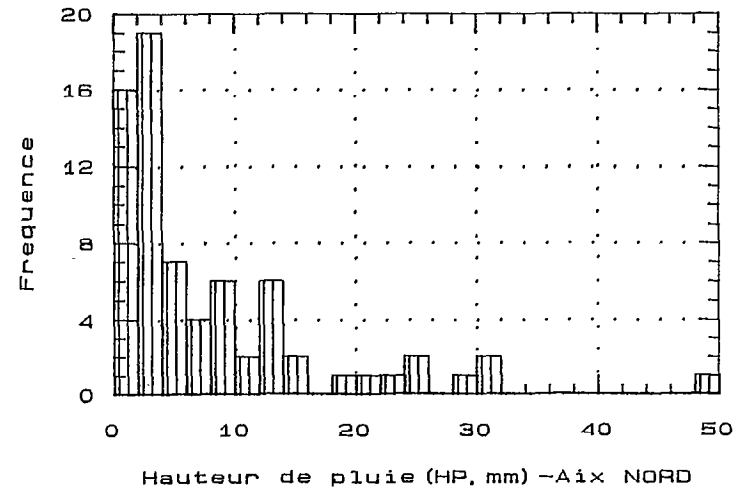
Histogramme des Frequences

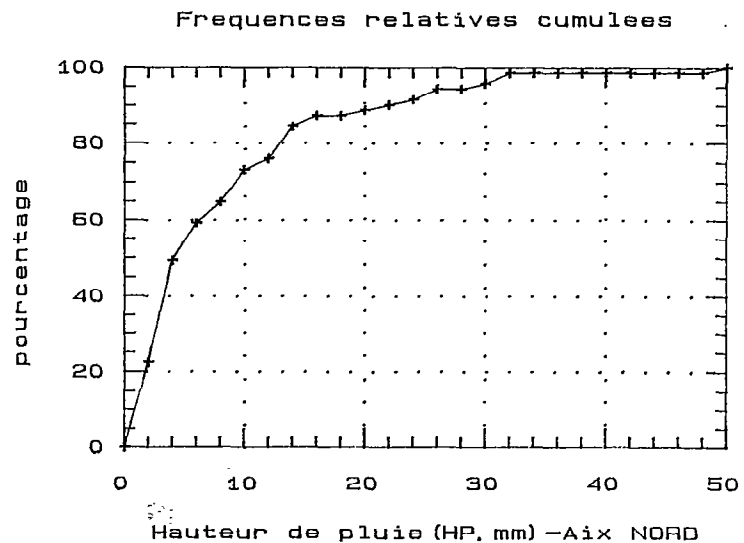
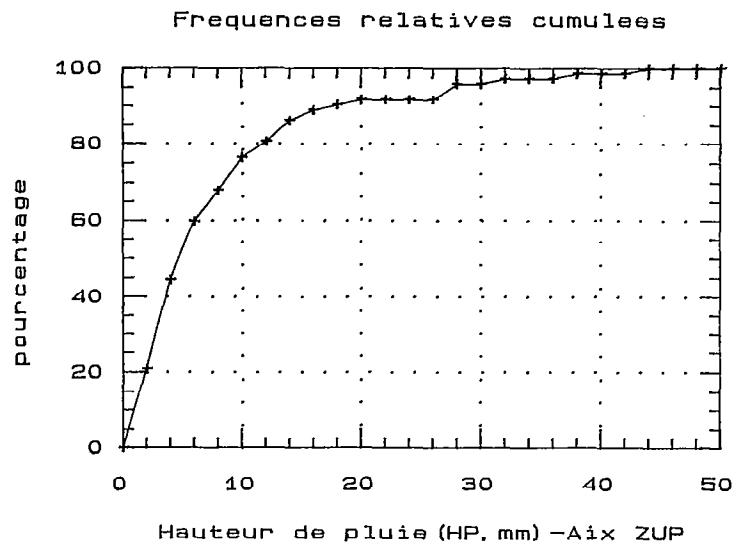
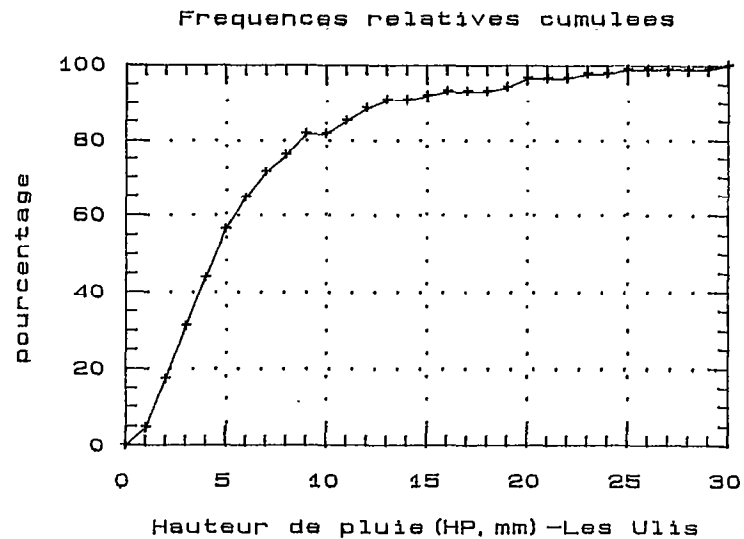
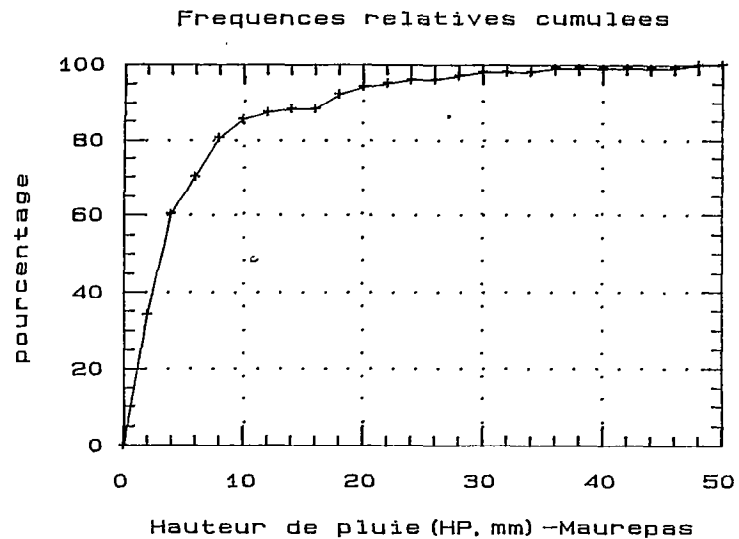


Histogramme des Frequences

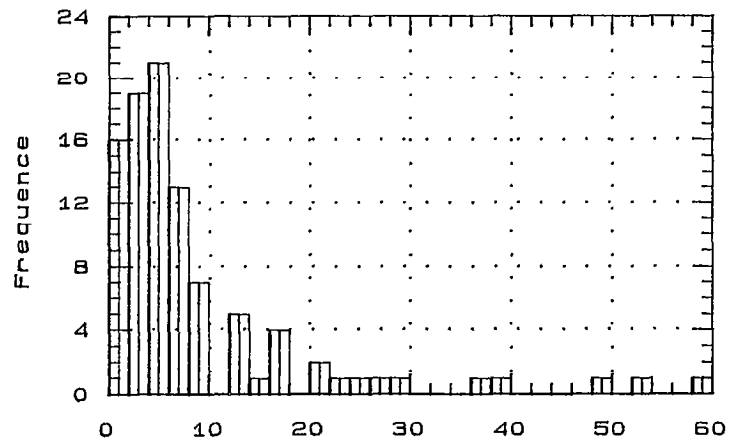


Histogramme des Frequences



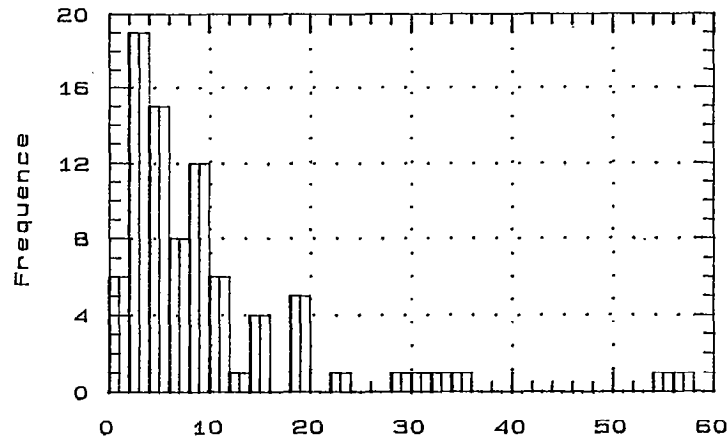


Histogramme des Frequences



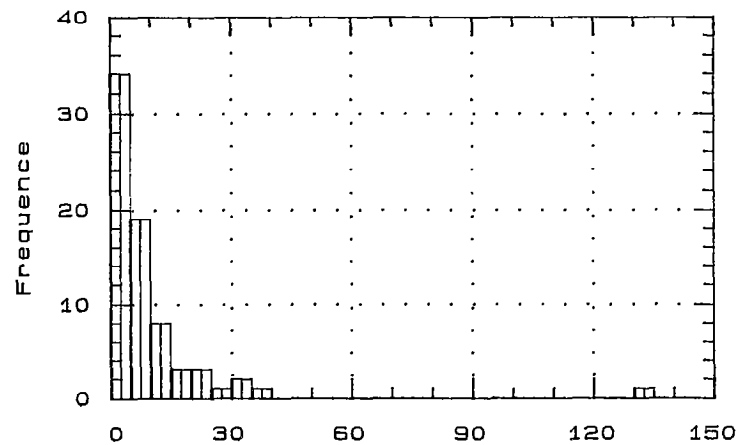
Intens. max en 5mn (IMAX5, mm/h) -Maurepas

Histogramme des Frequences



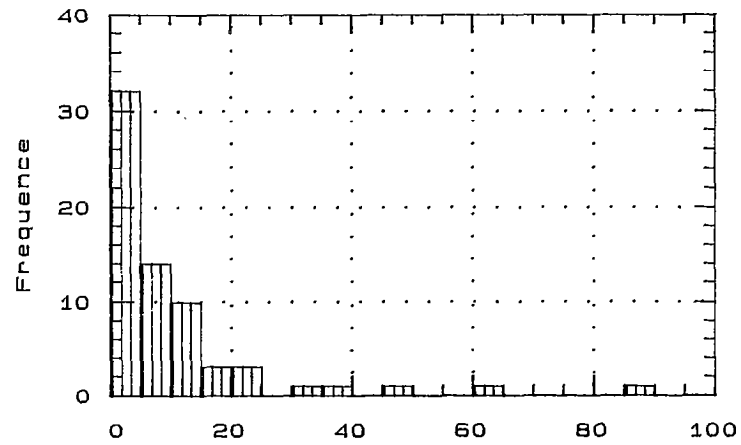
Intens. max en 5mn (IMAX5, mm/h) -Les Ulis

Histogramme des Frequences



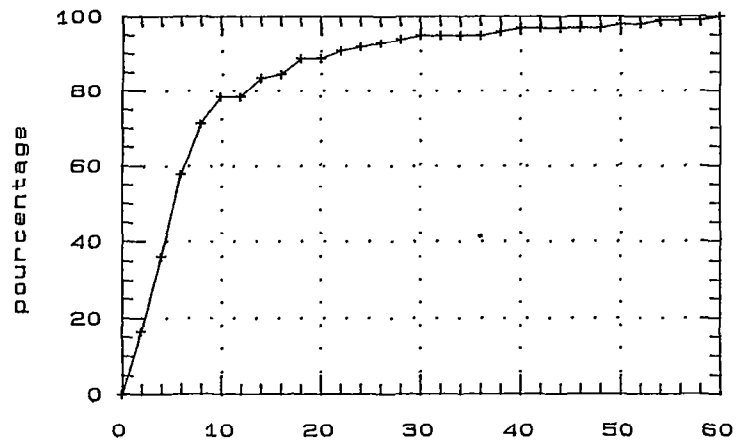
Intens. max en 5mn (IMAX5, mm/h) -Aix ZUP

Histogramme des Frequences



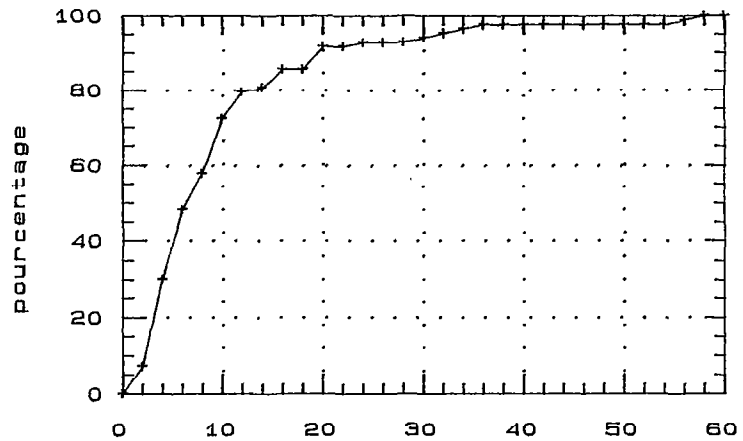
Intens. max en 5mn (IMAX5, mm/h) -Aix NORD

Frequences relatives cumulees



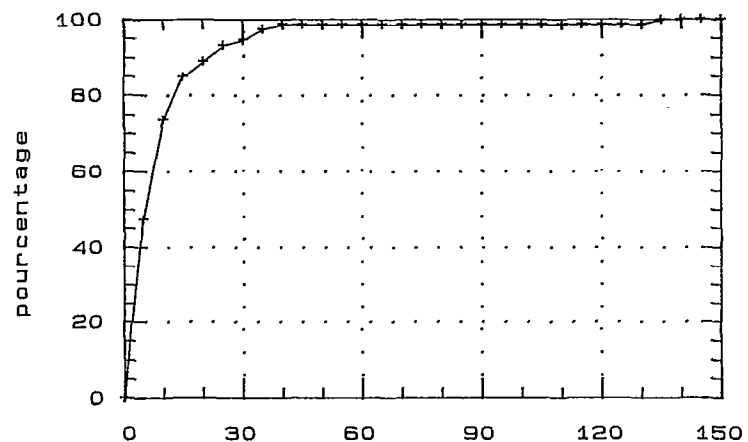
Intens. max en 5mn (IMAX5, mm/h) -Maurepas

Frequences relatives cumulees



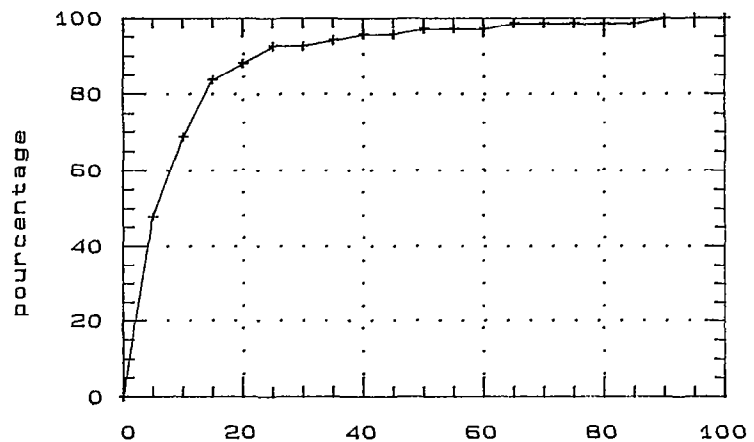
Intens. max en 5mn (IMAX5, mm/h) -Les Ulis

Frequences relatives cumulees



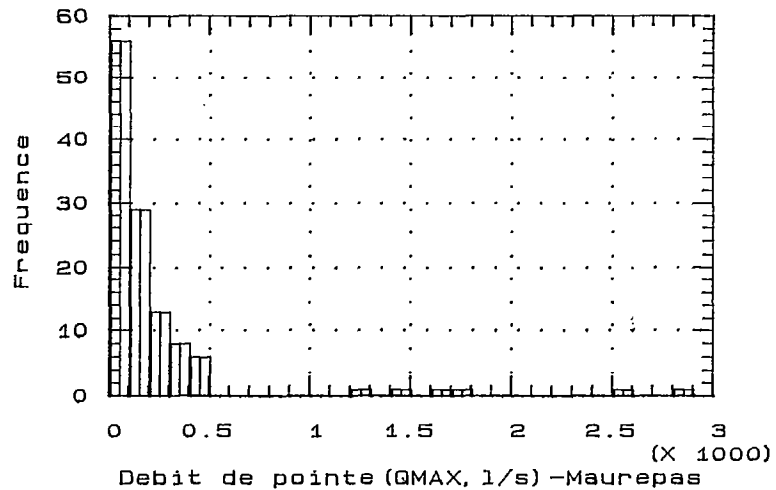
Intens. max en 5mn (IMAX5, mm/h) -Aix ZUP

Frequences relatives cumulees

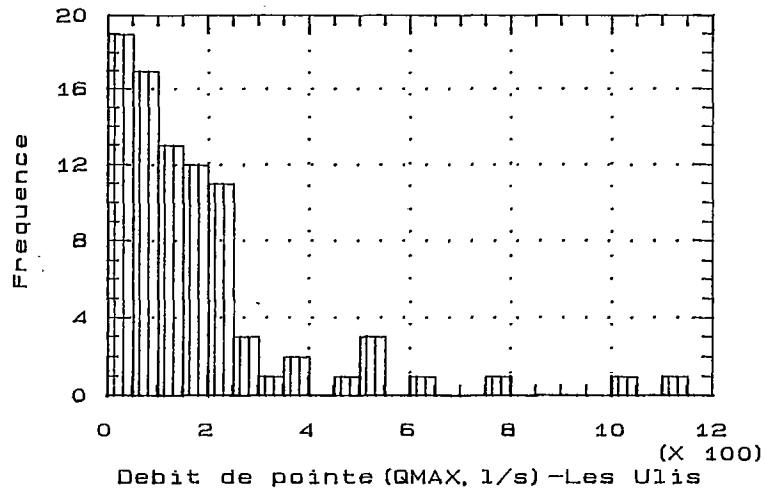


Intens. max en 5mn (IMAX5, mm/h) -Aix NORD

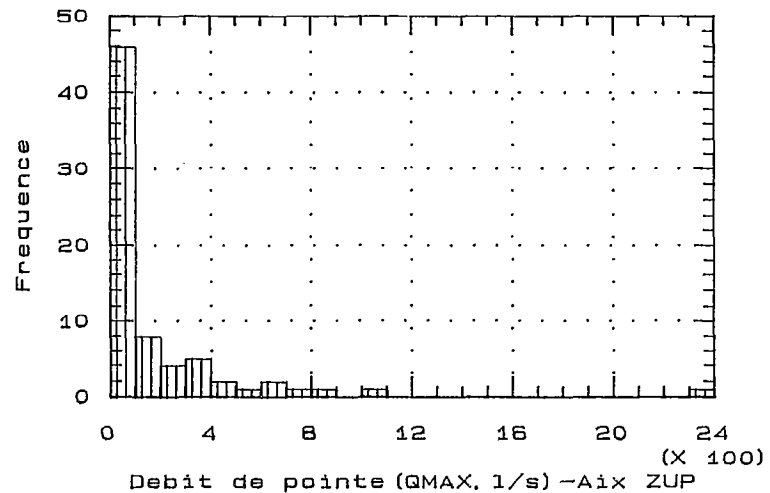
Histogramme des Frequences



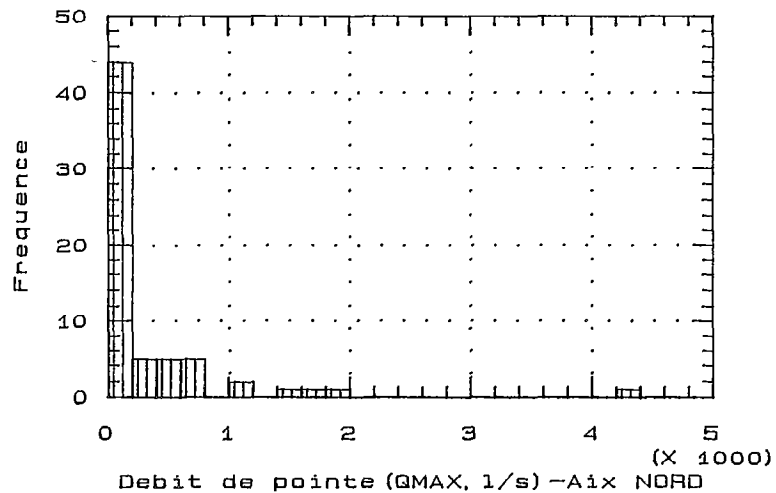
Histogramme des Frequences

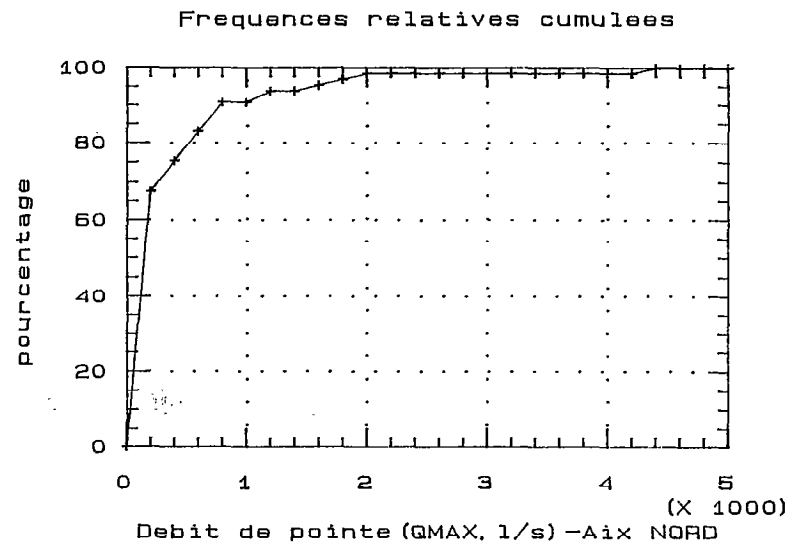
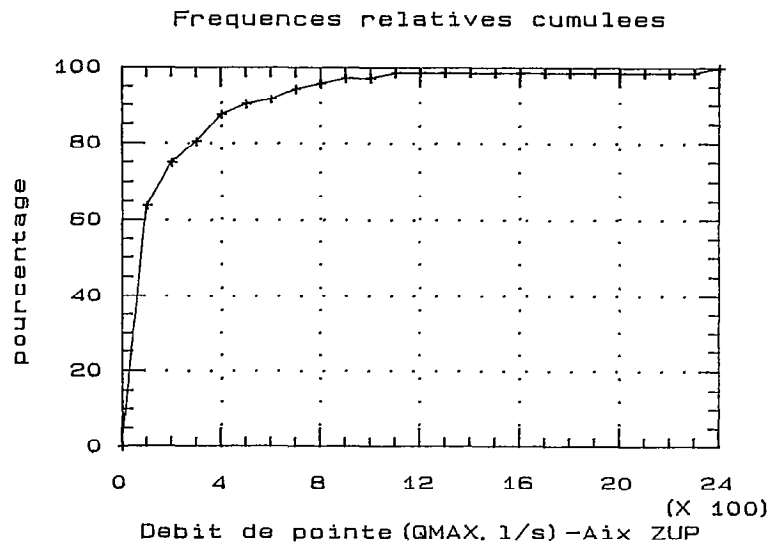
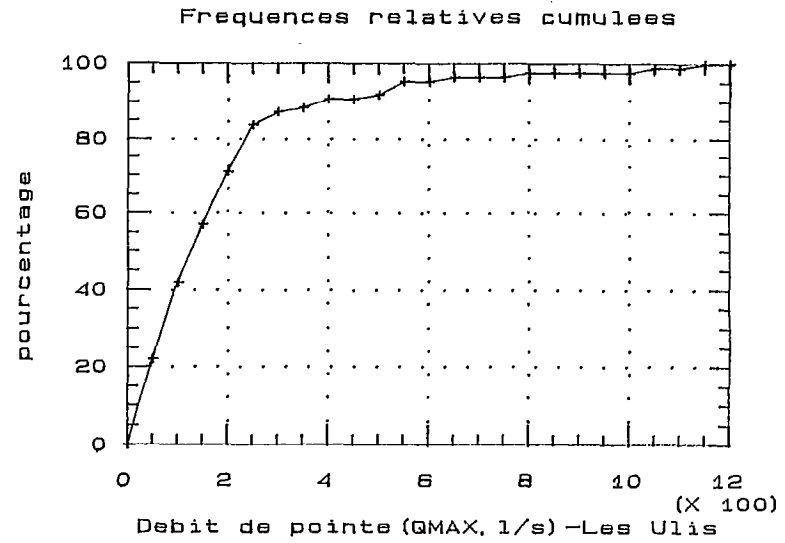
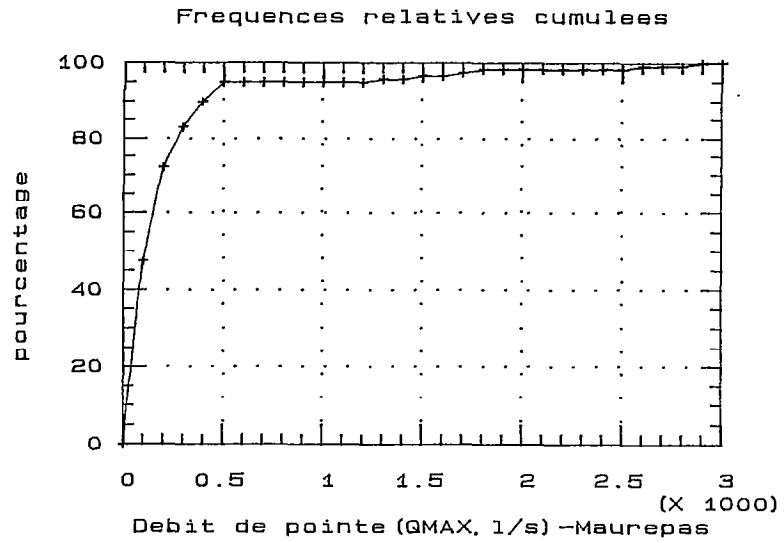


Histogramme des Frequences

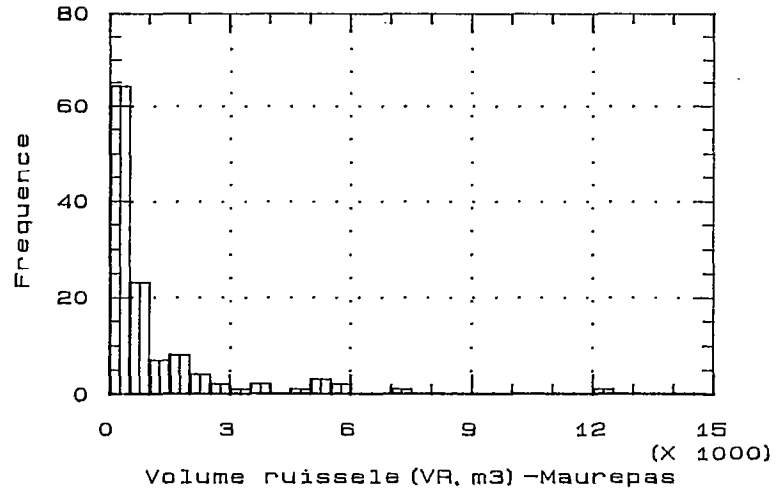


Histogramme des Frequences

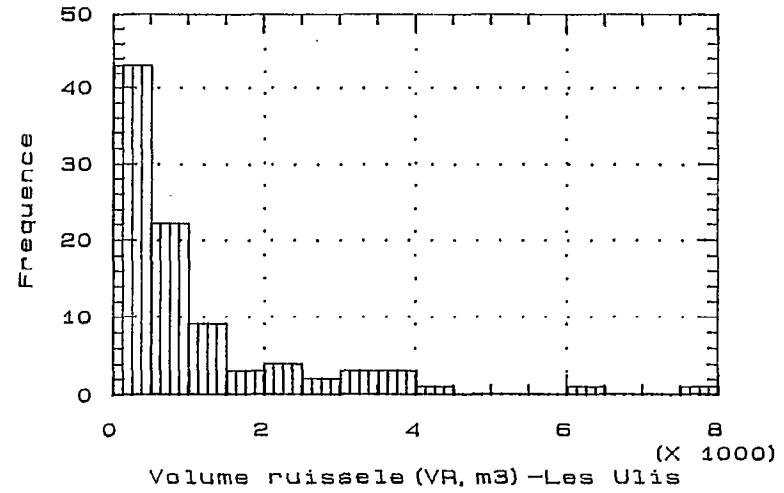




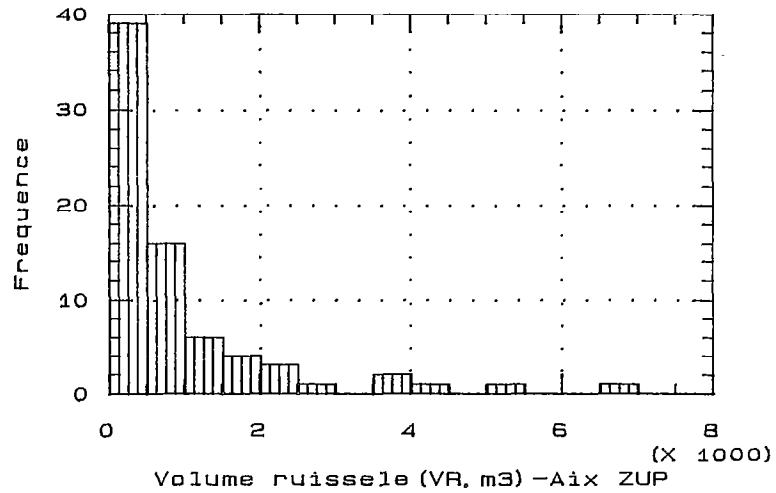
Histogramme des Frequences

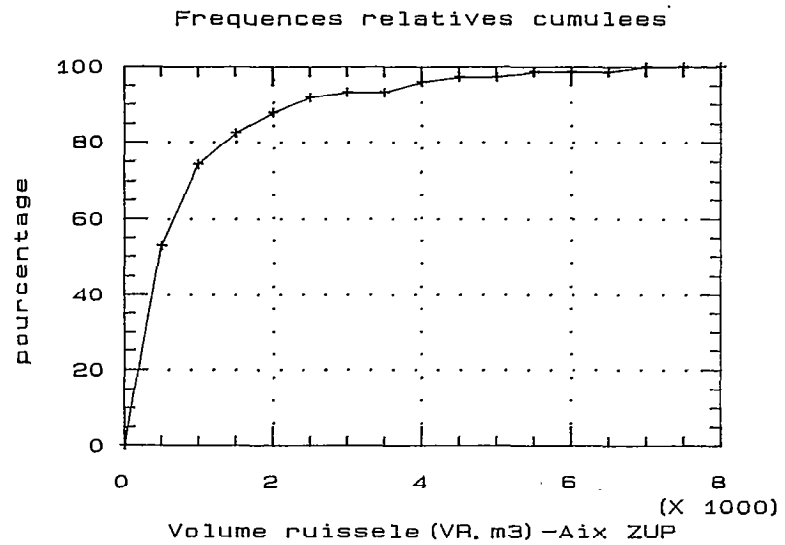
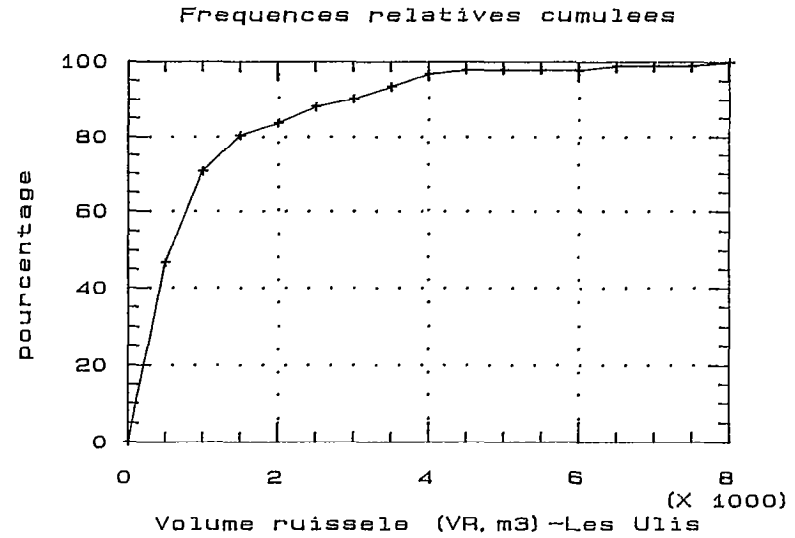
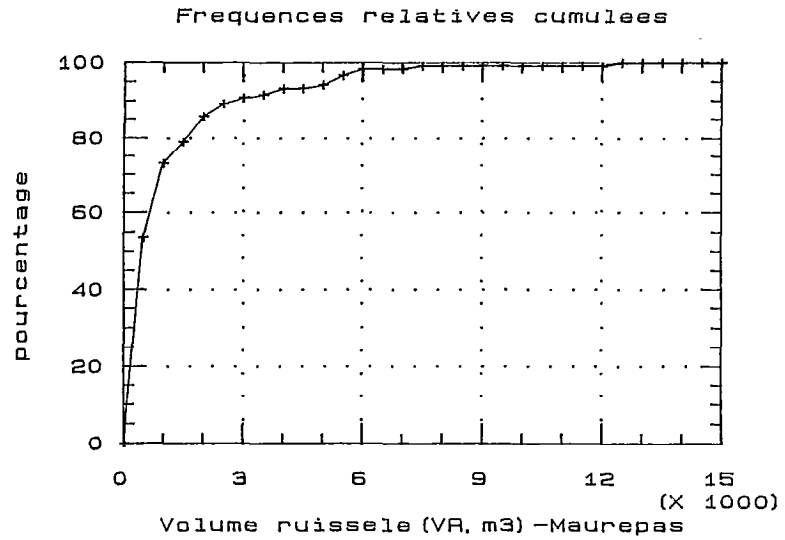


Histogramme des Frequences



Histogramme des Frequences





ANNEXE 3 :

Tracés relatifs à l'étude de sensibilité des différents paramètres.

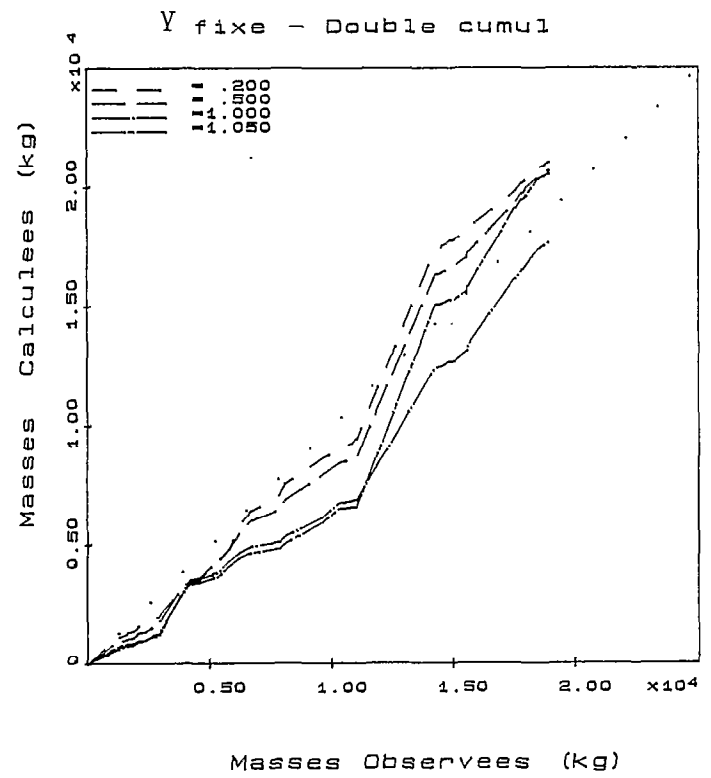
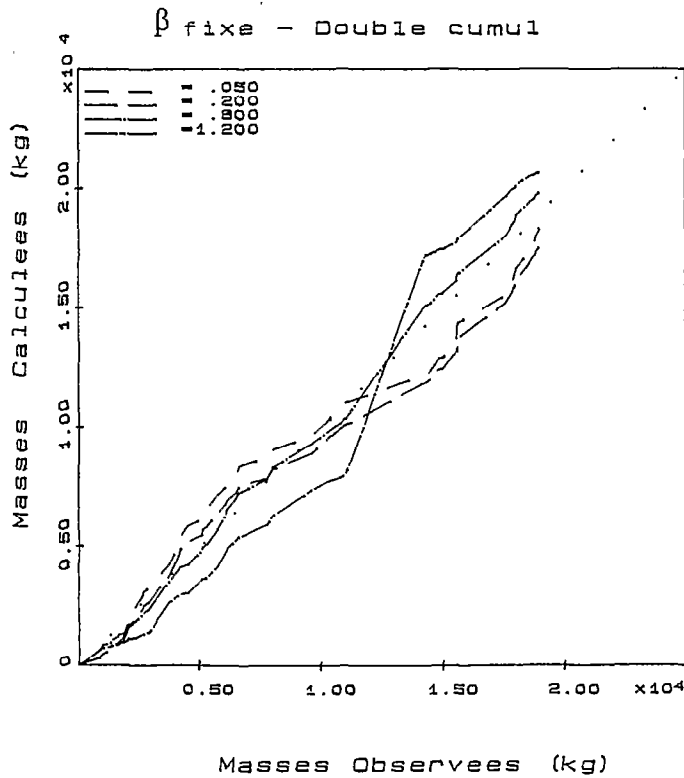
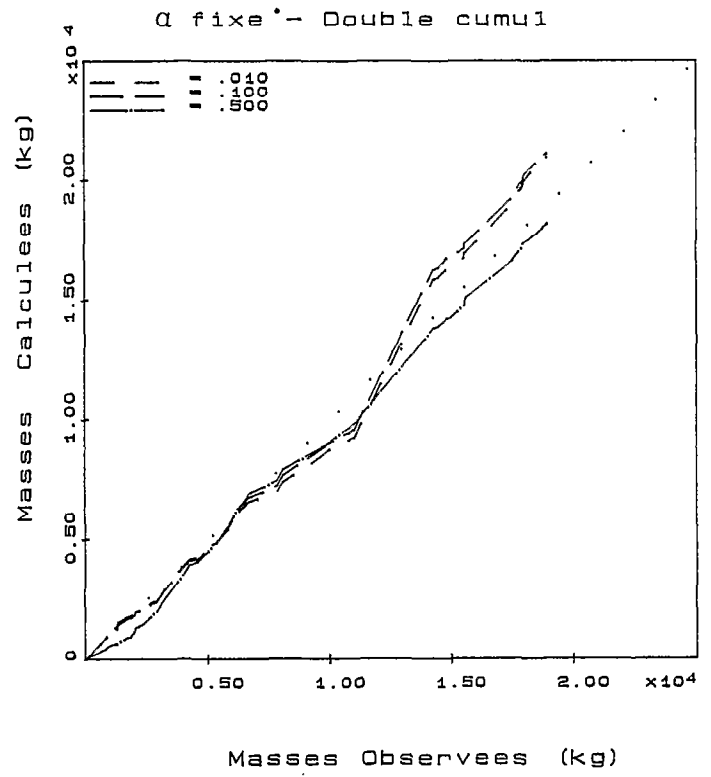
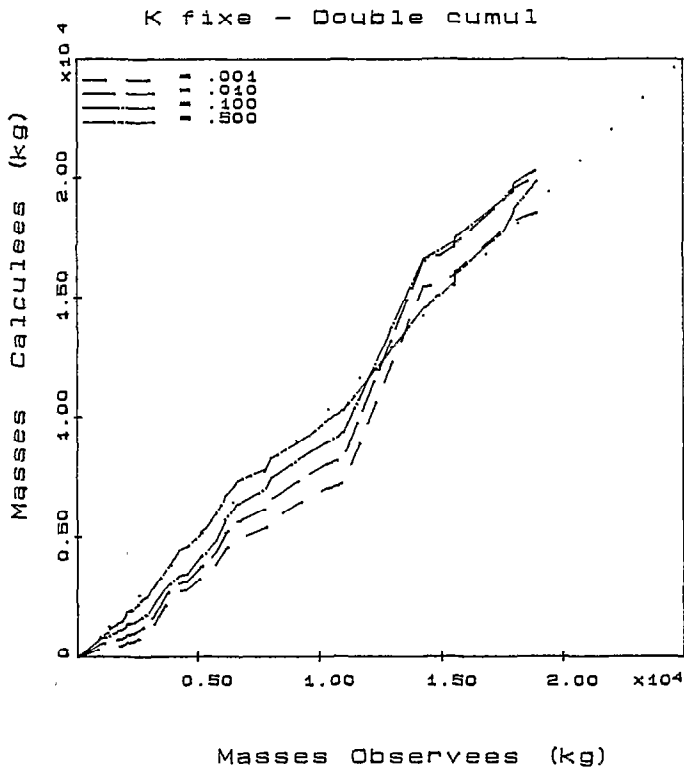


Figure : $E = K M d^{\alpha} I_{max} 5^{\beta} V r^{\gamma}$

Polluant : MES

B.V. : Aix-ZUP

Etude de sensibilite des differents parametres

Double cumul : masses calculées - masses observées
(sur la totalité de la période d'enregistrement)

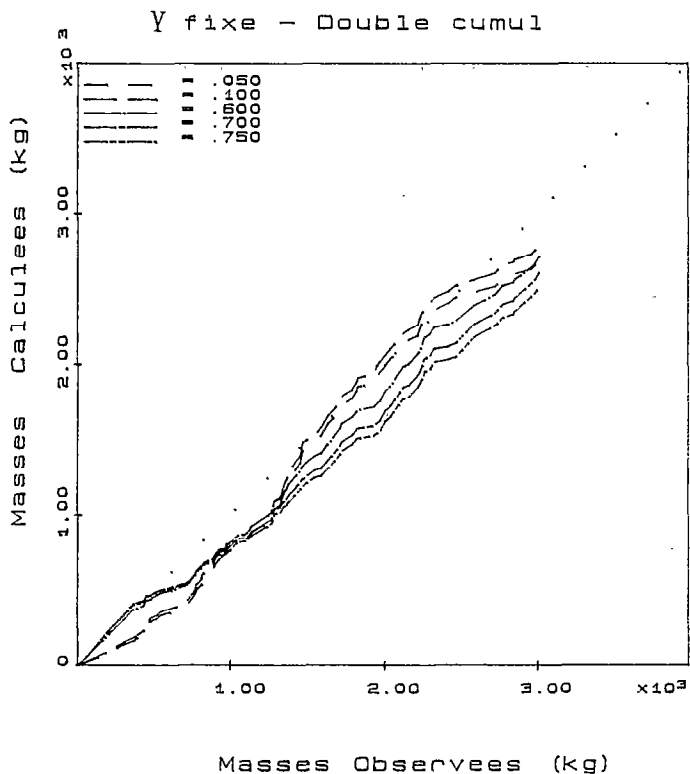
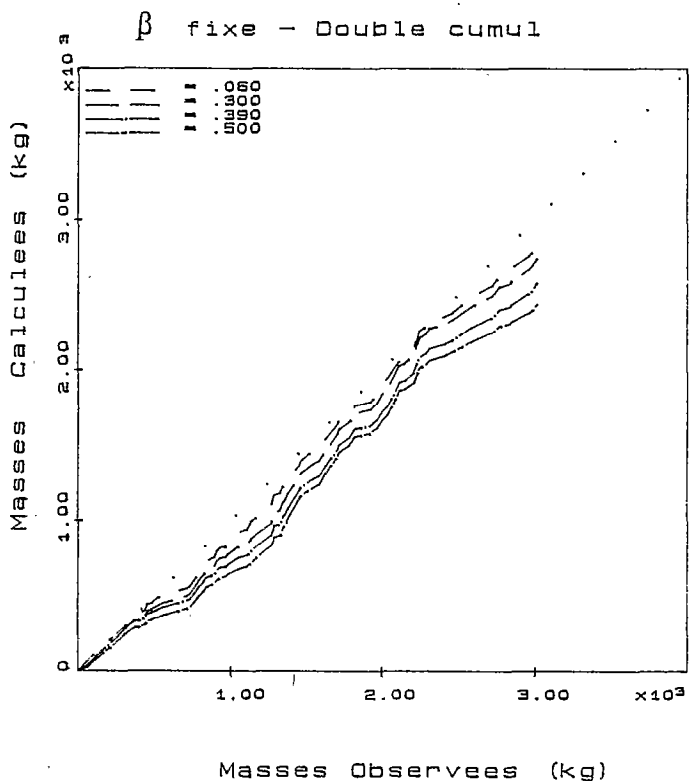
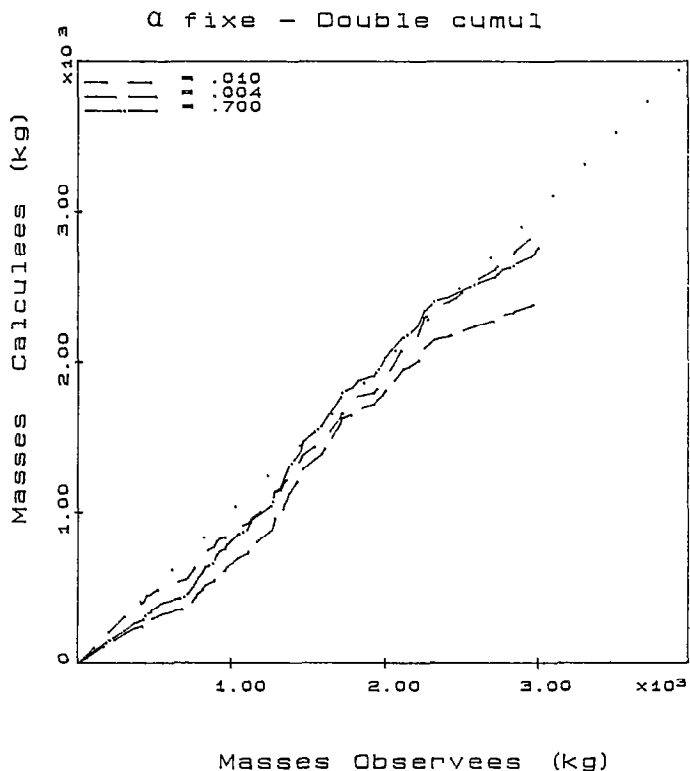
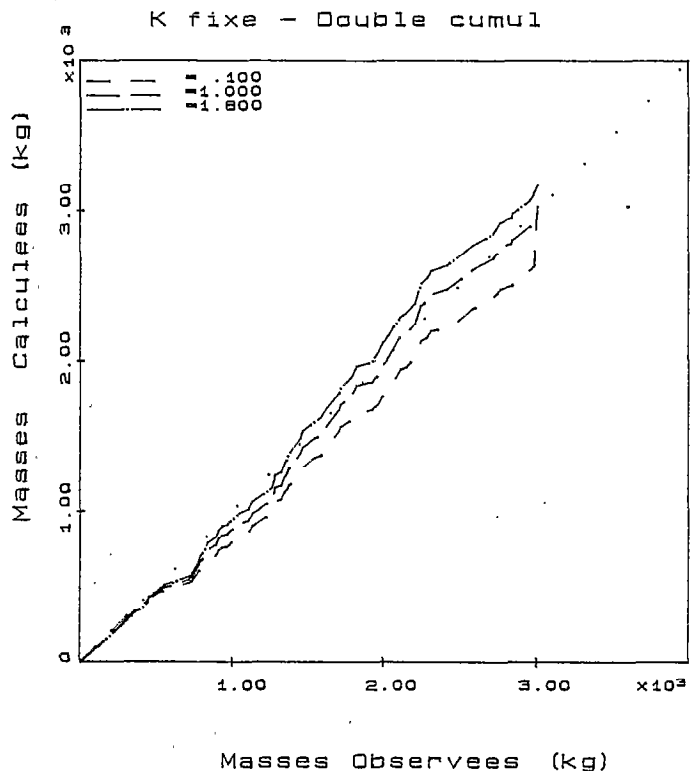


Figure : $E = K M d^{\alpha} I_{max}^{\beta} V r^{\gamma}$

Polluant : DB05 B.V. : Les Ulis

Etude de sensibilité des differents parametres

Double cumul : masses calcul es - masses observ es
(sur la totalité de la p eriod e d'enregistrement)

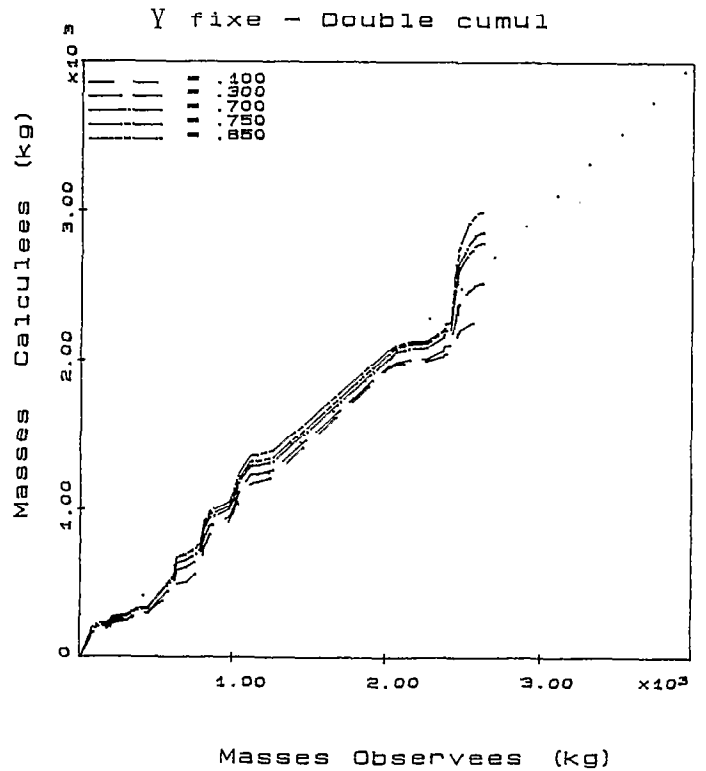
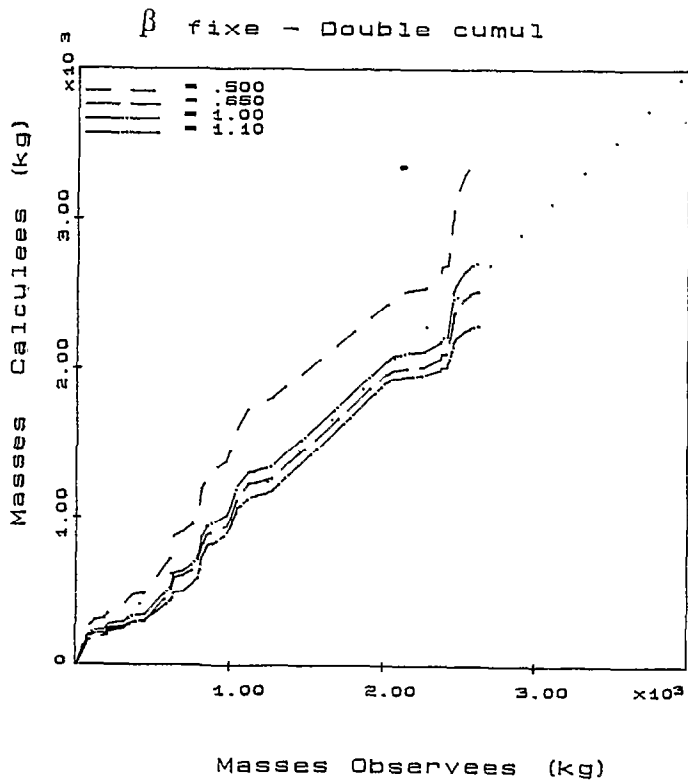
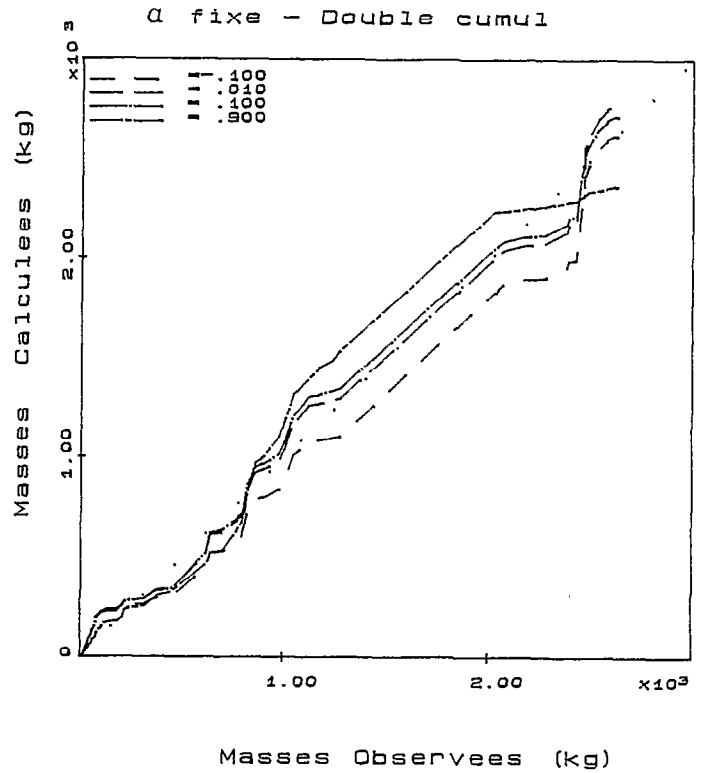
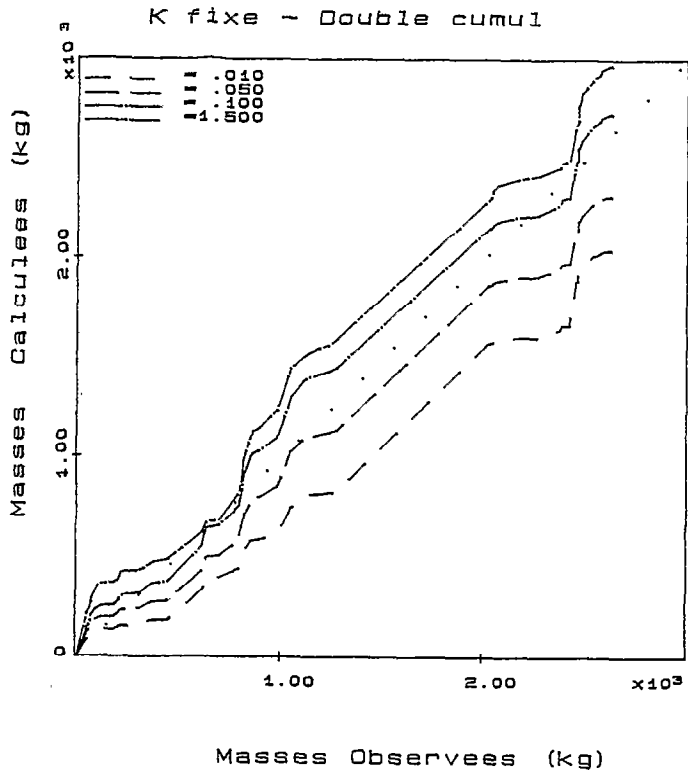


Figure : $E = K M d^a I_{max} S^\beta V r^Y$

Polluant : DB05 B.V. : Aix-ZUP

Etude de sensibilité des differents parametres

Double cumul : masses calcul es - masses observ es
(sur la totalité de la p eriod e d'enregistrement)

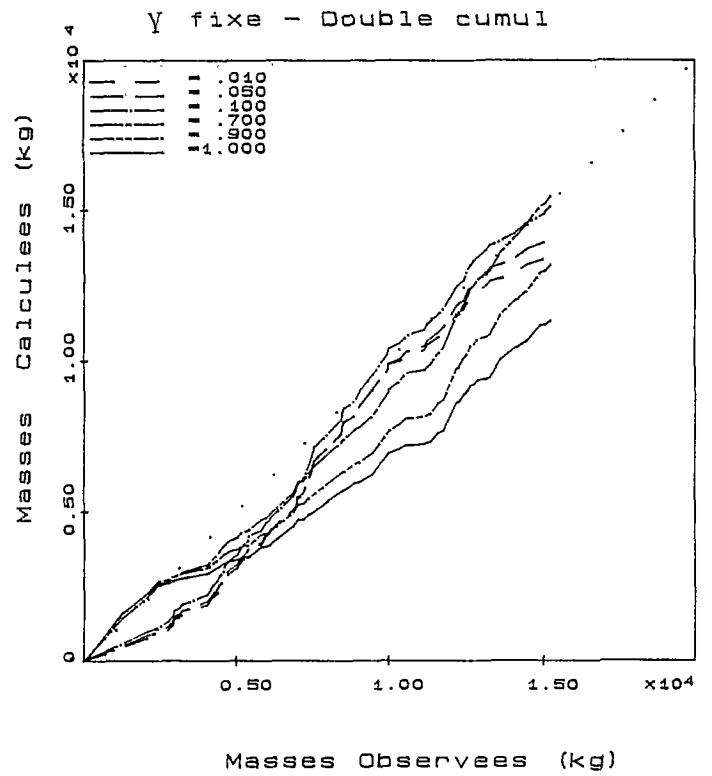
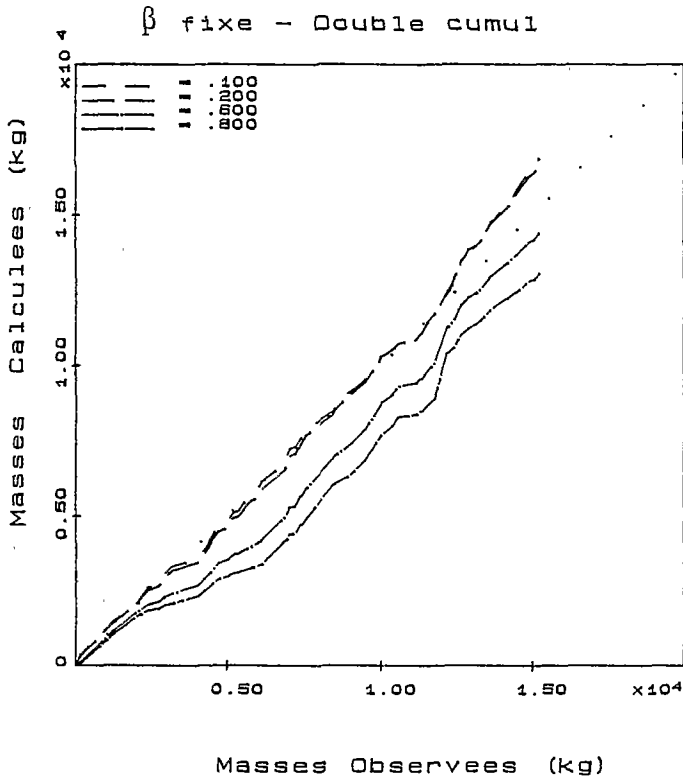
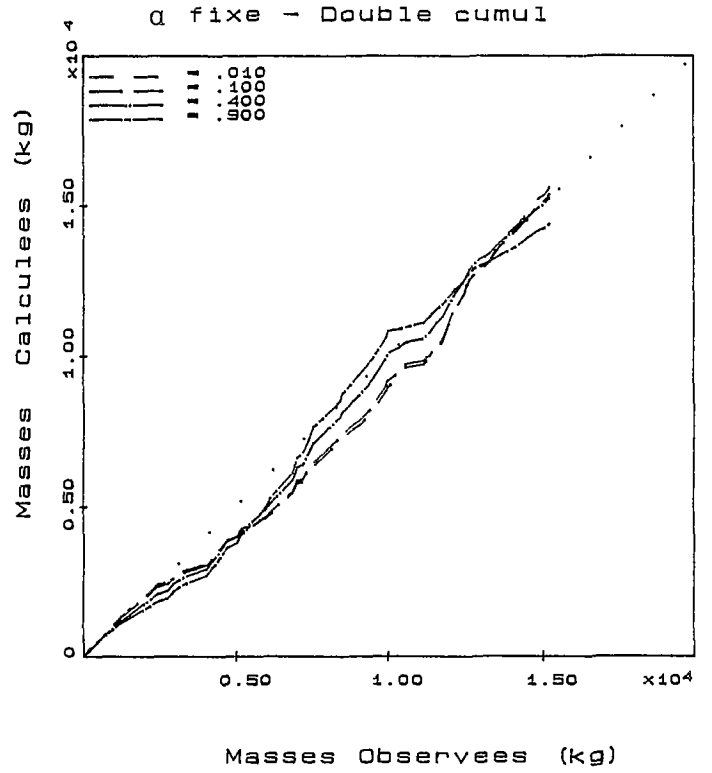
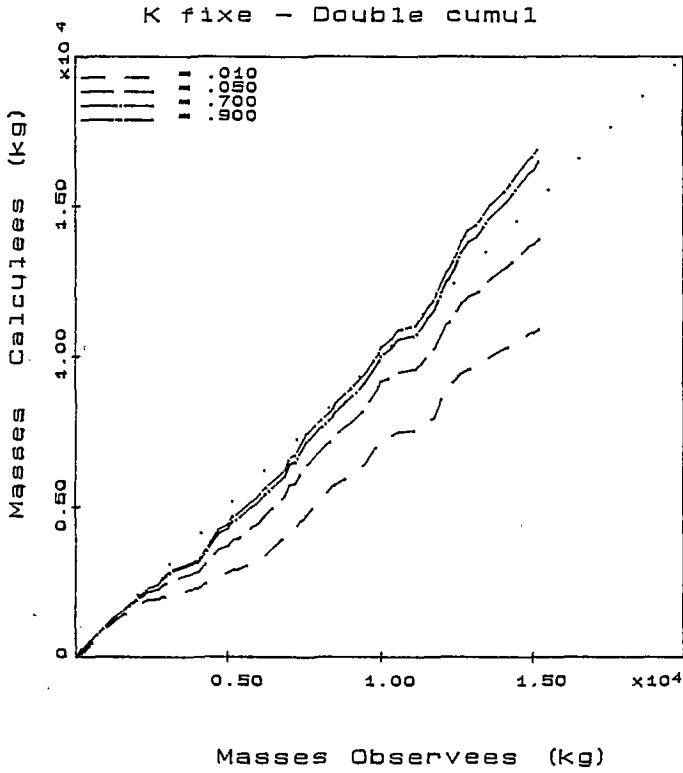


Figure : $E = K M d^\alpha I_{max} \beta V_r^\gamma$

Polluant : DCO B.V. : Les Ulis

Etude de sensibilite des differents parametres

Double cumul : masses calculees - masses observees
 (sur la totalite de la periode d'enregistrement)

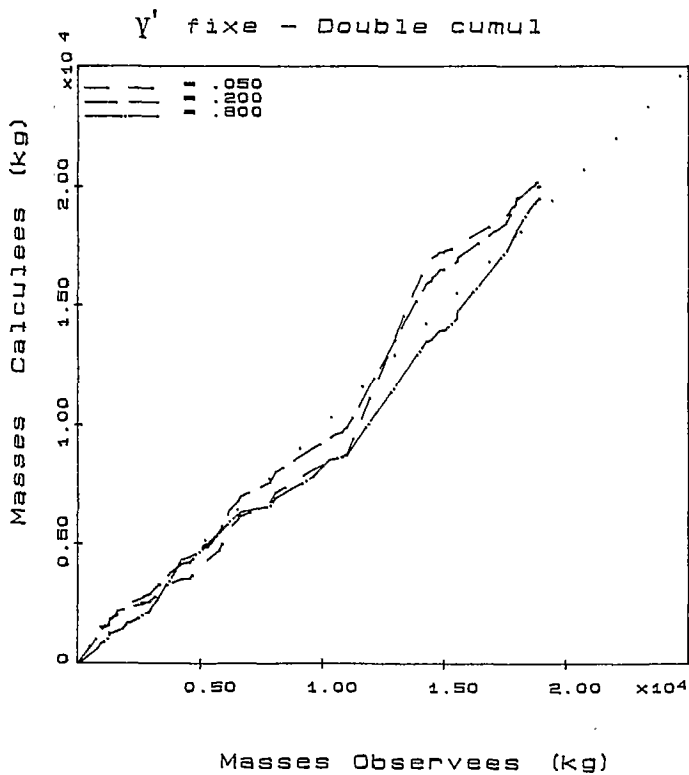
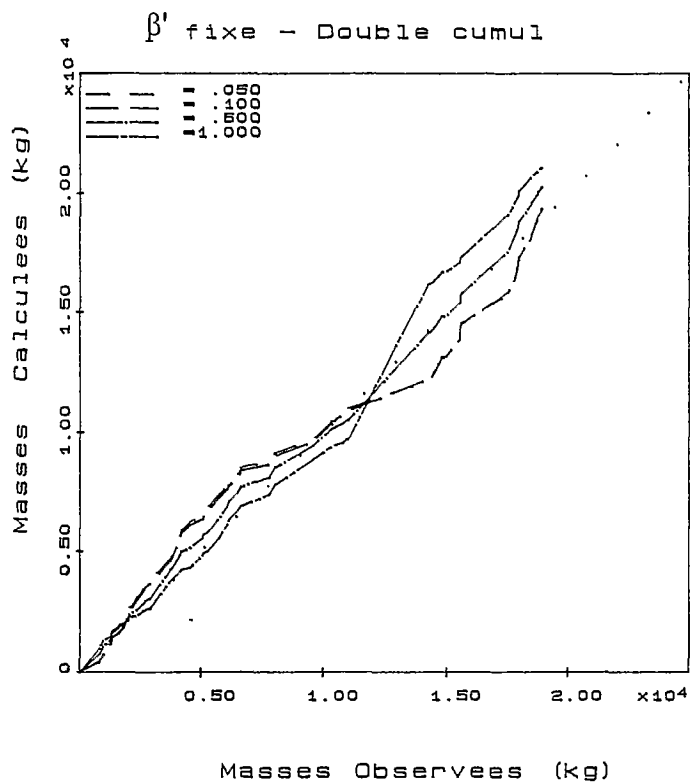
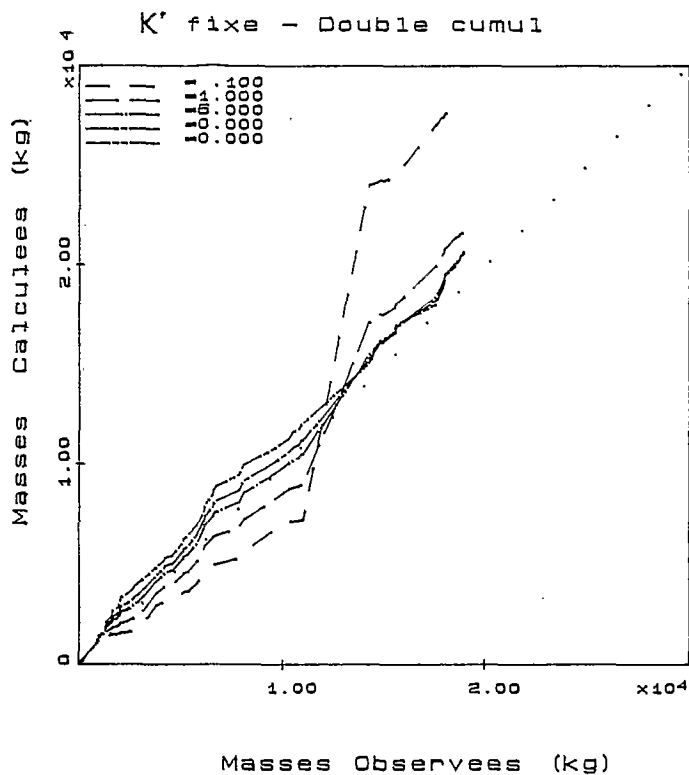


Figure : $E = K' I_{max} 5^{\beta'} V^n Y'$

Polluant : MES B.V. : Aix-ZUP

Etude de sensibilite des differents parametres

Double cumul : masses calculees - masses observees
(sur la totalite de la periode d'enregistrement)

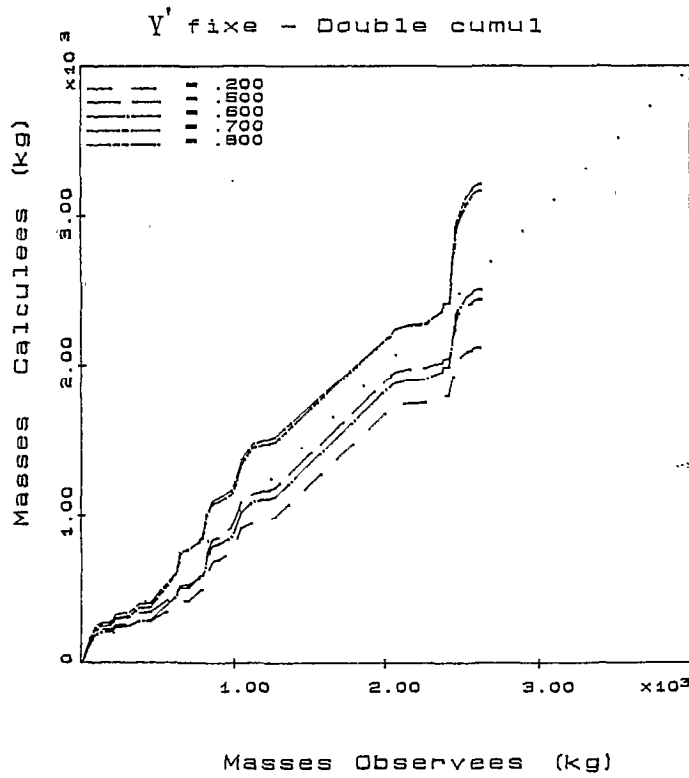
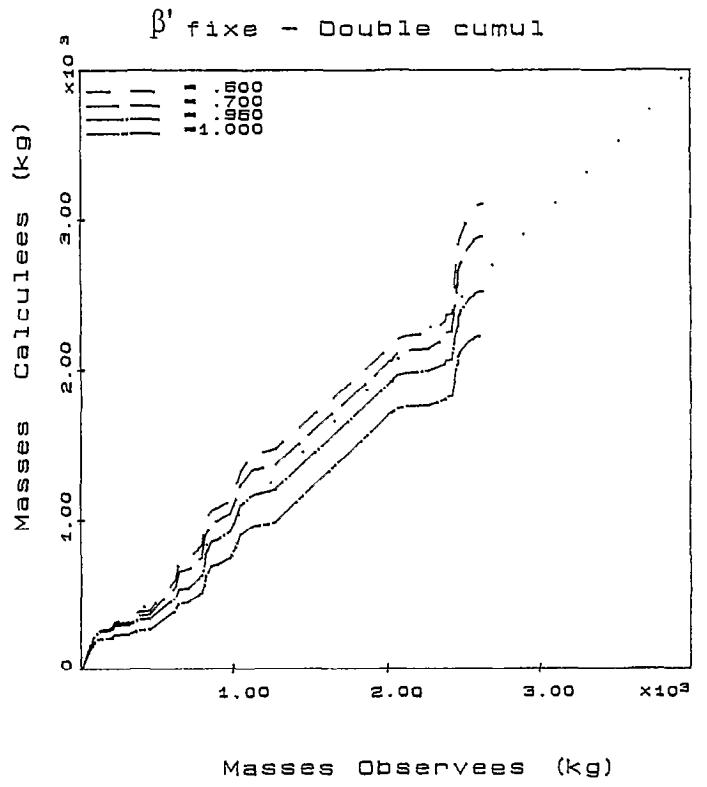
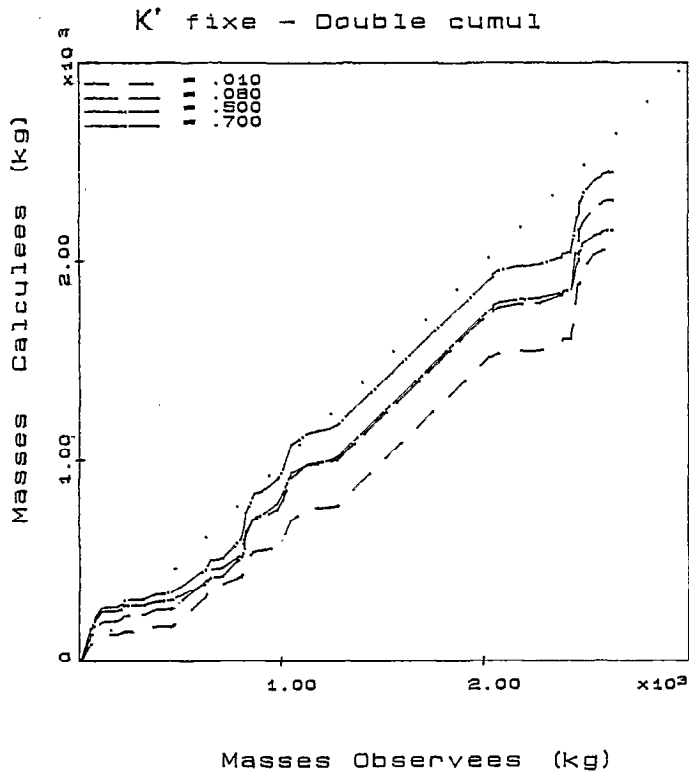


Figure : $E = K' \text{Imax} \beta' V^n Y'$

Polluant : DB05 B.V. : Aix-ZUP

Etude de sensibilité des différents paramètres

Double cumul : masses calculées - masses observées
(sur la totalité de la période d'enregistrement)

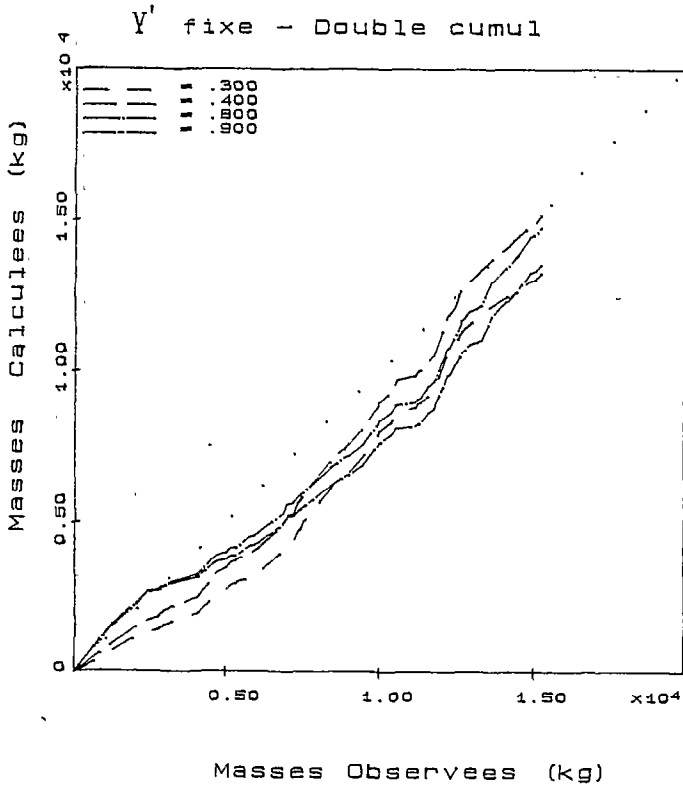
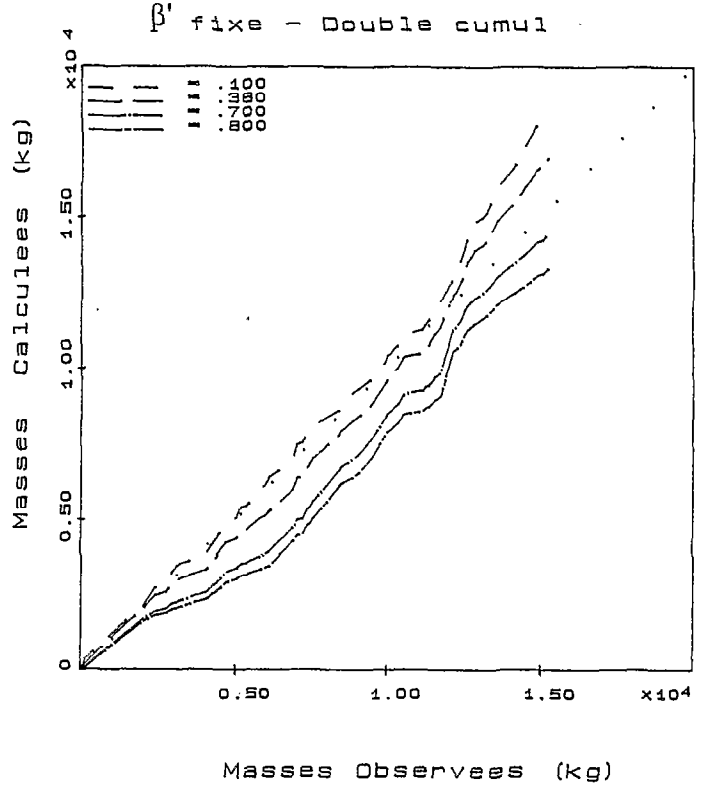
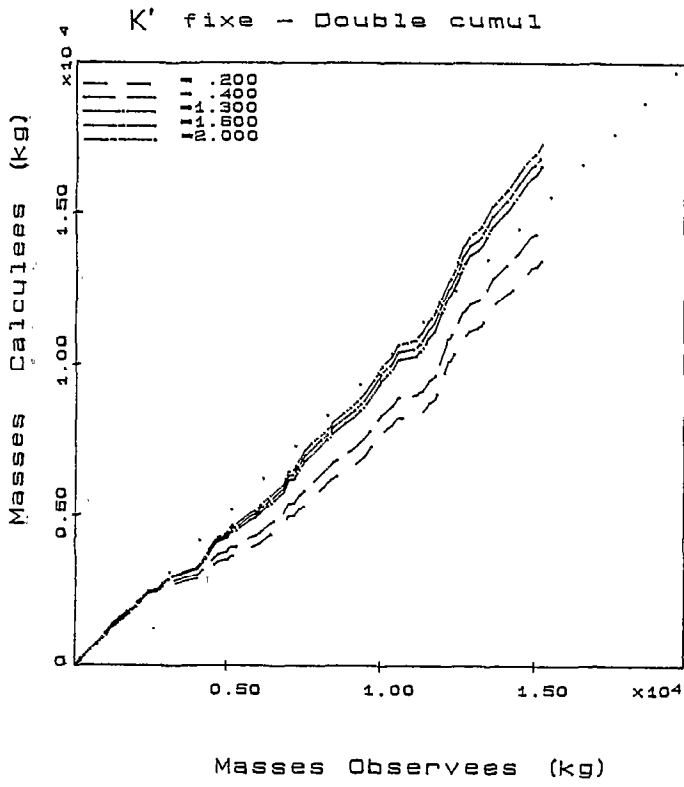


Figure : $E = K' \text{Imax5} \beta' V_r Y'$

Polluant : DCO B.V. : Les Ulis

Etude de sensibilite des differents parametres

Double cumul : masses calculees - masses observees
(sur la totalite de la periode d'enregistrement)