



HAL
open science

Approche d'une caractérisation simple de la pollution en hydrologie urbaine, à partir du couple temps sec/pluie

Pascale Stieber

► To cite this version:

Pascale Stieber. Approche d'une caractérisation simple de la pollution en hydrologie urbaine, à partir du couple temps sec/pluie. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Lorraine, 1996. Français. NNT : 1996INPL119N . tel-01776381

HAL Id: tel-01776381

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01776381v1>

Submitted on 24 Apr 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE
ECOLE NATIONALE DU GENIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT
DE STRASBOURG

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE GEOLOGIE DE NANCY

[M] 1996 STIEBER, P.

ECOLE DOCTORALE PROMEN

THESE

présentée à l'I.N.P.L.
en vue de l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'I.N.P.L.
EN GENIE CIVIL ET MINIER

par

Pascale Stieber

APPROCHE D'UNE CARACTERISATION SIMPLE DE
LA POLLUTION, EN HYDROLOGIE URBAINE,
A PARTIR DU COUPLE "TEMPS-SEC/PLUIE".

Soutenue le 24 Octobre 1996 devant la Commission d'Examen

Membres du Jury:

MM. LABORDE Jean-Pierre
OBERLIN Guy

DEUTSCH Jean-Claude
BERNHARD Claude

BUES Michel

Président et Rapporteur
Rapporteur

Examinateur
Examinateur

Directeur de thèse

QUALITÉ ET SPÉCIALITÉ DES MEMBRES DU JURY DE THÈSE

Jean-Pierre LABORDE
Rapporteur

Professeur des Universités
Université de Nice, Sophia Antipolis
Laboratoire d'Analyse Spatiale
98 boulevard E. Hériot - BP 369
06000 NICE
(spécialité : Hydrologie, Hydrogéologie)

Guy OBERLIN
Rapporteur

Directeur de Recherche ORSTOM
CEMAGREF - Groupement de Lyon
3 bis Quai Chauveau - CP 220
69336 LYON CEDEX 09
(spécialité : Hydrologie, Hydraulique)

Claude BERNHARD
Examineur

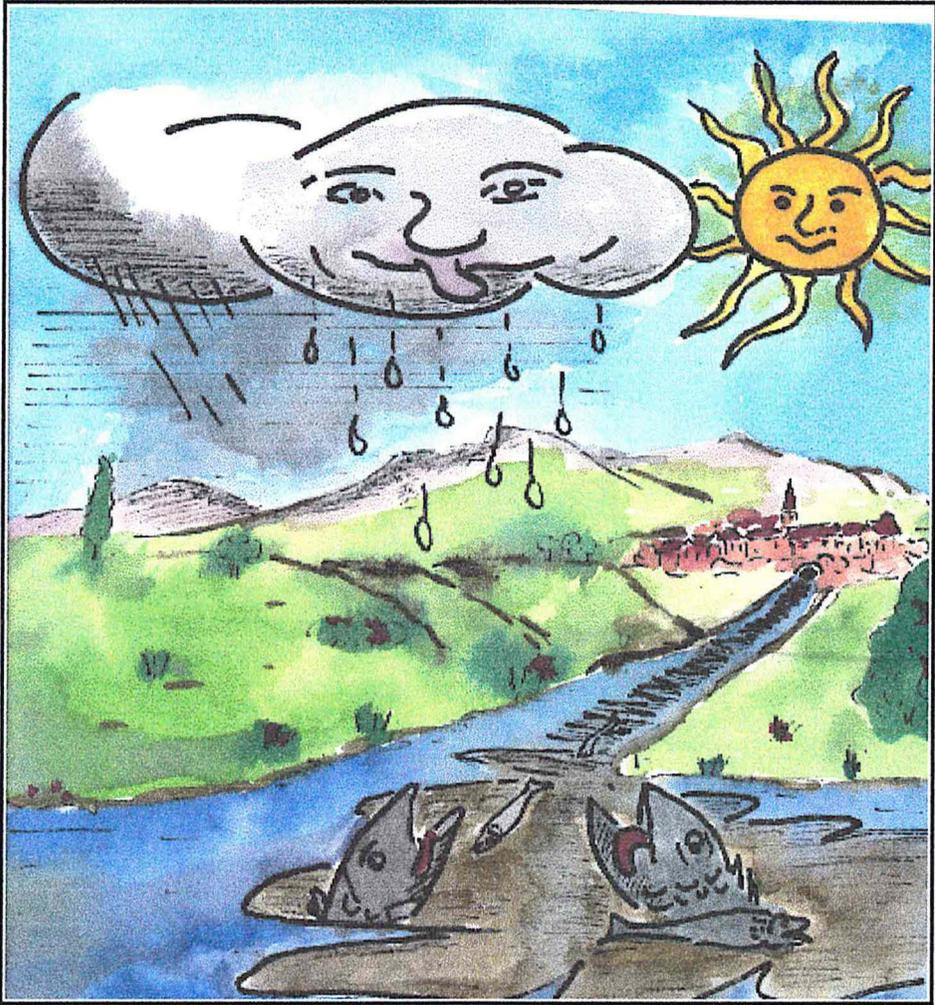
Directeur des Études à l'ENGEES
Correspondant du DEA PAE3S à l'ENGEES
ENGEES
1 Quai Koch - BP 1039 F
67070 STRASBOURG CEDEX
(spécialité : Traitement de données)

Jean-Claude DEUTSCH
Examineur

Professeur à l'ENPC
Directeur du CERGRENE
Courtine Central II
Boulevard Mont d'Est
93160 NOISY-le-GRAND
(spécialité : Hydrologie urbaine)

Michel A. BUÈS
Directeur de Thèse

Professeur des Universités
ENSG - Laboratoire de Géomécanique
Rue du Doyen Marcel Roubault - BP 40
54501 VANDŒUVRE-lès-NANCY
(spécialité : Mécanique des Fluides)



*Mélanie,
Nicolas,*

"L'eau est la chose la plus nécessaire à l'entretien de la vie, mais il est aisé à la corrompre... car pour la terre, le soleil, les vents, ils ne sont point sujets à être empoisonnés, ni détournés ni dérobés, tandis que tout cela peut arriver à l'eau qui pour cette raison a besoin que la loi vienne à son secours..."

"Les Lois-Livre VII" PLATON

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	17
CHAPITRE I - CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	21
1. Recherche bibliographique	21
1.1. Aspects réglementaires.....	21
1.2. Les préoccupations du point de vue de la recherche	22
1.21. Historique	22
1.22. Un domaine de recherche toujours d'actualité.....	23
1.3. Etat des connaissances actuelles	24
1.31. Connaissances relatives à la pollution	24
1.311. Origine de la pollution.....	24
1.312. Paramètres et effets de la pollution	25
1.313. Quelques chiffres relatifs à la pollution.....	25
1.314. La modélisation	29
1.32. Connaissances relatives à la pluviométrie	30
1.321. Quels liens entre la pluie et la pollution - aspect qualitatif.....	30
1.322. L'étude hydrologique - aspect quantitatif.....	31
2. Objectifs de l'étude.....	32
3. Quelques compléments de réflexion en guise de conclusion.....	34
CHAPITRE II - DONNEES UTILISEES.	37
1. Quels étaient les sites disponibles?.....	37
2. Description du site d'Entzheim.....	37
2.1. Situation d'Entzheim.....	37
2.2. Description sommaire du site de mesure.....	39
2.21. Le réseau d'assainissement.....	39
2.22. Le bassin d'orage	39
2.23. Equipement en matériel de mesure	40
2.3. Description et fonctionnement du bassin versant	41
2.4. Caractéristiques du Bassin Versant d'Entzheim.....	43

3. Choix des variables.....	43
3.1. Les variables couramment utilisées	43
3.11. En hydrologie	43
3.12. En assainissement	45
3.2. Les variables retenues	46
3.21. Pluviométrie.....	46
3.22. Pollution.....	47
4. Extraction des données	48
4.1. Pluviométrie	48
4.2. Pollution.....	49
5. Notions d'incertitude sur les enregistrements	50
CHAPITRE III - TRAITEMENTS STATISTIQUES	57
1. Analyse de la pluviométrie	57
1.1. Description des échantillons	57
1.11. Répartition des variables dans le temps - "saisonnalisation"	57
1.12. Analyses numériques.....	59
1.13. Liens entre les variables - Résultats de l'A.C.P.	62
1.2. Ajustement de lois.....	65
2. Analyse de la pollution	65
2.1. Analyses numériques et comparaison	65
2.11. Description générale de l'échantillon de pollution	65
2.12. Analyse de la pluviométrie observée.....	67
2.13. Analyse de la pollution observée.....	67
2.2. Liens entre les variables - Résultats de l'A.C.P.	70
2.21. Vérification des liens entre les variables de pluviométrie.....	70
2.22. Etude des liens entre les variables de pluviométrie et les variables de pollution.....	70
3. Les régressions linéaires	73
3.1. Choix des variables.....	73
3.2. Les résultats sur l'échantillon d'Entzheim	73
3.3. Comparaisons avec d'autres sites	75
4. Conclusion	75

CHAPITRE IV - MODELISATION DE LA POLLUTION	79
1. Rappel des principes et théories de la modélisation.....	79
1.1. Définition d'un modèle.....	79
1.2. Etapes dans l'élaboration d'un modèle mathématique.....	81
1.21. Identification.....	81
1.22. Adéquation	81
1.221. Calage	81
1.222. Critère de calage	82
1.23. Sensibilité et erreurs.....	82
1.24. Validation et limite d'application	83
2. Modélisation de la pollution.....	83
2.1. Principaux mécanismes de la production de pollution	83
2.2. Identification des phénomènes et des modèles correspondants.....	84
2.21. L'accumulation des polluants en surface.....	85
2.22. Les dépôts dans les réseaux	87
2.23. La mobilisation de la pollution de surface par la pluie.....	88
2.24. L'apport de temps sec.....	90
2.3. Modèles et paramètres retenus	91
2.31. Construction des modèles.....	91
2.32. Valeurs appliquées à certaines variables et certains paramètres spécifiques aux modèles.....	92
2.33. Expression des modèles testés	93
2.4. Adéquation	94
2.41. Calibration	94
2.42. Critère de calage.....	94
2.5. Sensibilité.....	95
2.6. Validation.....	95
2.7. Limites d'application.....	95

CHAPITRE V - RESULTATS DE LA MODELISATION ET CARACTERISATION DE LA

POLLUTION.....	99
1. Résultats de la modélisation	99
1.1. Résultats obtenus pour les MES _{tot}	99
1.11. Calage des modèles sur l'échantillon de pollution complet.....	99
1.111. Détermination des bornes des variables	99
1.112. Calage des modèles.....	100
1.12. Calage des modèles sur un échantillon réduit	103
1.121. Définition du nouvel échantillon de calage	103
1.122. Calage des modèles sur l'échantillon réduit.....	105
1.13. Etude de sensibilité	107
1.131. Modèle SWMM-SWMM.....	107
1.132. Modèle Servat-SWMM	109
1.133. Modèle SWMM-Servat	111
1.134. Modèle Servat-Servat.....	113
1.135 Conclusion de l'étude de sensibilité	115
1.2. Résultats obtenus pour les autres variables (MES _{max/h} , MES _{max} et MES _{moy}).....	115
1.21. Adaptation des modèles aux variables.....	116
1.22. Présentation des résultats.....	116
1.221 La détermination des bornes des variables.....	118
1.222 Le calage sur 38 valeurs	118
1.223 Le "jacknife"	120
1.224 Le calage sur un échantillon réduit.....	121
1.3. Synthèse des expressions mathématiques obtenues-	127
1.4. Conclusions relatives au calage des modèles	128
2. Caractérisation de la pollution.....	130
2.1. Mise en place d'un générateur de pollution.....	130
2.2. Ajustement de lois.....	133
2.3. Détermination de la période de retour.....	134
2.4. Comparaison des lois de fréquences.....	135
3. Conclusion	136

CONCLUSION	141
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	147
Liste des tableaux	153
Listes des figures	155
ANNEXES	161

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Les usages légitimes de l'eau doivent, pour être mieux garantis, être mieux partagés. A la demande quantitative, s'est progressivement ajoutée une demande qualitative forte.

De tout temps, la préoccupation première des urbanistes et des hygiénistes a été d'acheminer les eaux souillées hors des agglomérations vers un émissaire, souvent un cours d'eau. Dans le domaine de l'**assainissement**, la construction de réseaux d'évacuation des eaux usées et des eaux pluviales est en voie d'achèvement dans presque toutes les communes du territoire français.

De nos jours, le développement des activités piscicoles, sportives et touristiques, ainsi que les associations de protection de l'environnement revendiquent la sauvegarde du patrimoine naturel. C'est pourquoi le rejet des eaux usées dans le milieu naturel est, dans la majorité des cas, précédé d'un traitement en station d'épuration.

Cependant, après les Etats-Unis, le législateur français a pris conscience de la gravité des dégradations apportées au milieu naturel lors des rejets urbains par temps de pluie. C'est pourquoi depuis le début des années 1990, la nécessité de veiller au respect de l'environnement, y compris par temps de pluie, est devenue un impératif nouveau et supplémentaire pour les aménageurs.

Cette nouvelle contrainte a eu des répercussions sur la conception des stations d'épuration puis, plus récemment, sur la mise en oeuvre de dispositifs de **rétenion des eaux pluviales de ruissellement**, tels que des bassins d'orage qui se sont vus plus nombreux et pour lesquels une réelle efficacité a été recherchée.

C'est dans ce souci d'adéquation, du point de vue du dimensionnement et du fonctionnement, que divers bassins de dépollutions expérimentaux sont en cours d'études. Mais, la compréhension du fonctionnement de ces ouvrages face à un événement pluvieux ne peut se faire sans une bonne détermination du volume d'eau ruisselé, ni sans une connaissance approfondie de la composition des eaux d'entrée et de sa **fréquence d'apparition**.

C'est pourquoi de nombreuses études se sont déjà intéressées à la description quantitative et qualitative des eaux de ruissellement, au cours du temps, suivant un épisode pluvieux. La plupart du temps, ces études se sont attachées à traiter des flux globaux, mais n'ont pris que plus rarement en compte les variations de charge durant l'événement pluvieux.

Ce travail s'inscrit dans le domaine de l'étude préliminaire, à l'amont de la construction d'ouvrage à vocation principale d'assainissement. Jusqu'à présent tout dimensionnement d'ouvrage relatif au temps de pluie s'est appuyé sur la connaissance des volumes et débits ruisselés, alors que la

charge polluante de ces événements pluvieux n'est pas encore prise en compte dans les calculs. Ceci n'a rien de surprenant, car il est très difficile de préjuger de sa répartition dans le temps, sans campagne de mesures.

Plusieurs travaux de recherche tendent à montrer que la **charge polluante peut être concentrée sur les premiers temps du ruissellement**, créant un premier flot de pollution communément appelé "first flush". Mais les facteurs influençant la répartition de la concentration dans le temps sont bien mal connus. Ils dépendent probablement du climat (type de précipitation, intensités, volume, durées des temps secs...), de la géographie du bassin versant (taille, exposition, pente, nature géologique ...) et de son urbanisation.

Plusieurs équipes de chercheurs se sont penchées sur ces problèmes de quantification et de modélisation de flux de pollution (Carra, 1988; Bertrand-Krajewski, 1992; Marquet, 1993). Tous ont mis en évidence que la **charge de pollution, surtout en Matières En Suspension, était une fonction croissante de la durée de temps sec précédant l'événement pluvieux** ainsi que de l'intensité de cet épisode. Le comportement de l'intensité, le débit et le volume ruisselé, qu'engendre une pluie, sont connus depuis bien longtemps des hydrologues. Le temps sec séparant deux épisodes pluvieux, quant à lui, a fait l'objet de travaux du point de vue spatial et en probabilité d'occurrence dans le temps. Mais la caractérisation, en terme de fréquences, de la pollution n'a pas encore été étudiée faute de pouvoir disposer d'un échantillonnage de données suffisant. Aussi il a été décidé d'engager l'étude ci-après.

Ce travail est divisé en plusieurs parties:

- un premier chapitre rappellera de façon plus précise, le contexte dans lequel s'inscrit ce travail, ainsi que ses objectifs,
- un deuxième chapitre expliquera le déroulement de l'acquisition et la préparation des données en vue des divers traitements,
- un troisième chapitre exposera le traitement des données du point de vue statistique, qu'il s'agisse des lois marginales ou de l'étude des régressions linéaires issues de l'analyse de données,
- une quatrième partie présentera les différents modèles de pollution qui serviront à l'évaluation de la quantité de pollution faisant suite à un événement pluvieux,
- un cinquième chapitre sera consacré aux résultats de la modélisation, et à la description d'un "**générateur**" de pollution qui permet d'approcher la période de retour d'un événement en terme de pollution. Une tentative de simplification du mécanisme d'obtention des périodes de retour sera abordée par la comparaison des lois issues du générateur avec les lois de fréquence du couple.

CHAPITRE I - CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

CHAPITRE I - CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

1. Recherche bibliographique

1.1. Aspects réglementaires

En hydrologie urbaine, la circulaire de 1977 (circulaire de 1977 n°77.284/INT), précisant les règles de dimensionnement des égouts pluviaux ou unitaires, se réfère uniquement à une période de retour des pluies, généralement décennale, fixée en l'absence de données locales par la loi de Montana ($I = at^b$), dont a et b sont des paramètres régionaux.

Aucun texte réglementaire, ni circulaire, ni directive ne précisent comment prendre en compte les paramètres de pollution dans le dimensionnement des ouvrages de transport et de retenue dans un système d'assainissement.

Toutefois un certain nombre de textes réglementaires régissent les rejets urbains par temps de pluie dont les principaux sont (Stieber, 1993) :

⇒ la loi du 16 décembre 1964 relative au "régime et à la répartition des eaux et à la lutte contre leur pollution" et dont l'article 1 précise que les dispositions s'appliquent aux déversements, écoulements, rejets, ... et tout fait susceptible de provoquer la dégradation des eaux,...

⇒ une circulaire de janvier 1970 est l'une des premières dispositions réglementaires traitant des eaux pluviales, elle prévoit une contribution du budget communal au service de l'assainissement si l'évacuation des eaux pluviales se fait dans le réseau de la commune,

⇒ le décret du 23 février 1973, qui réglemente les conditions techniques auxquelles sont subordonnées les autorisations de déversements,

⇒ l'arrêté du 13 mai 1975, qui précise dans son article 9, commenté par la circulaire du 14 janvier 1977, la réglementation propre aux rejets d'eaux pluviales,

⇒ la circulaire du 4 novembre 1980 qui détermine la qualité minimale des effluents urbains,

⇒ la directive européenne du 21 mai 1991 impose l'obligation du traitement des eaux résiduaires pour autant qu'elles soient rassemblées dans un réseau de collecte. C'est le premier texte à faire un rapprochement entre eaux usées et eaux pluviales pour la réduction de leur pollution respective, et dont la transposition a été effective dans le droit français.

⇒ la loi du 3 janvier 1992 sur l'eau, qui oblige les collectivités territoriales à adopter une véritable politique de gestion des eaux et énonce les sanctions encourues en cas de non-respect de la législation,

Cette liste n'est pas exhaustive, d'autres textes pouvant être concernés tels que:

- le code rural, articles 107 - 112,
- le code du domaine public fluvial, articles 25 - 33,-
- la loi du 10 juillet 1976 concernant les études d'impact et la protection de l'environnement,
- la législation des établissements classés.

De tous ces textes et plus particulièrement de la loi sur l'eau de janvier 1992, il ressort que l'attention des concepteurs et maîtres d'ouvrage est attirée sur la nécessité de prévoir des installations suffisantes pour ne pas nuire au milieu naturel et donc en préserver sa qualité. Ainsi, le texte indique qu' "il est nécessaire de prévoir des installations pour assurer la collecte, le stockage éventuel et, en tant que de besoin, le traitement des eaux pluviales et de ruissellement...", mais l'innovation réside dans l'établissement et l'énoncé des sanctions encourues pour toutes pollutions quel qu'en soit l'auteur. Ce texte ne donne aucune indication de dimensionnement d'ouvrage, il se contente d'imposer une obligation de résultats sans préciser les moyens à mettre en oeuvre.

C'est pourquoi les collectivités territoriales sont intéressées par toutes les études qui devraient, de près ou de loin, les aider à mieux gérer leurs rejets.

1.2. Les préoccupations du point de vue de la recherche

1.2.1. Historique

L'hydrologie urbaine se veut une science à part entière qui traite du cycle de l'eau dans la ville. Cette science a connu un regain d'intérêt et a sensiblement progressé ces vingt dernières années. Les techniques d'assainissement ont évolué et de nouveaux principes ont été développés principalement dans la gestion et la conception des réseaux pluviaux : bassins de rétention et autres techniques alternatives, pré-traitement des eaux de ruissellement, ouvrages de régulation, gestion automatisée en temps réel, banques de données et systèmes experts.

Même s'il reste beaucoup à faire pour que l'assainissement pluvial ne soit plus considéré comme un simple domaine d'application du génie civil traitant d'une conséquence banale de l'urbanisation, des pas importants ont été franchis.

Depuis plus de 30 ans de nombreuses études sur les rejets urbains par temps de pluie ont été menées de par le monde. Dès les années 60, les Etats-Unis se sont intéressés à la pollution occasionnée par les rejets urbains par temps de pluie déversée en rivière et plus particulièrement aux rejets des déversoirs d'orage. En Europe, cette prise de conscience n'a eu lieu que dans les années 1975.

L'objectif des premiers travaux était de montrer que le problème était bien réel. Les recherches ont donc porté sur l'identification des polluants, en précisant leur quantité tant en flux qu'en concentration. Les résultats obtenus par des mesures simples se sont très vite révélés insuffisants pour la modélisation qui nécessite des données nombreuses, homogènes et précises. Ainsi en 1981,

Jewell et Adrian (1981), ont décrit la campagne idéale que doivent monter les modélisateurs pour que les données recueillies soient utilisables pour le calage et la validation de modèles.

En 1978, le Service Technique de l'Urbanisme (Hémain, 1985), rattaché au Ministère de l'Urbanisme et du Logement, a créé un groupe de travail "Pollution des Eaux de Ruissellement. Choix d'un système d'assainissement". Différents partenaires des Ministères concernés par le problème et plusieurs bureaux d'études ont contribué à cette étude. Les premières analyses bibliographiques ont montré que les données existantes n'étaient guère utilisables et qu'il était nécessaire de lancer en France une campagne nationale de mesure. Deux objectifs précis ont alors été définis :

- l'évaluation de la pollution moyenne annuelle liée au ruissellement pluvial pour divers modes d'occupation des sols afin de pouvoir déterminer, à long terme, l'évolution du milieu récepteur et afin de visualiser l'influence du type d'urbanisme,

- l'évaluation des risques de pollution importante pouvant perturber gravement, à un instant donné, la qualité des eaux du milieu récepteur.

La campagne expérimentale s'est déroulée sur quatre bassins versants expérimentaux de moins de 100 hectares drainés : deux en région parisienne, Maurepas et Plaisir-la-Boissière (ultérieurement remplacé par Les Ulis en raison de certains désordres dans le système d'assainissement), et deux à Aix-en-Provence, Aix-Zup et Aix-Nord. Ces bassins étaient représentatifs de deux types d'occupation des sols : un habitat individuel (pavillonnaire) et un habitat collectif discontinu (grands ensembles). La campagne a effectivement commencé en septembre 1980 pour s'achever en décembre 1982. Les diverses données recueillies ont été analysées et critiquées.

Un autre domaine de recherche s'est développé : la modélisation des phénomènes producteurs de pollution. Ainsi, avec l'avènement de l'informatique qui offre des possibilités de calcul puissant, de nombreux outils de calcul utilisant des modèles mathématiques déjà bien connus (MOSQUITO, SWMM, MOUSE ou encore HYPOCRAS) ont vu le jour au début des années 1990. La mise au point de ces nouveaux outils a confirmé la nécessité de développer de nombreuses campagnes de mesures. L'instrumentation du bassin d'Entzheim résulte de cette démarche. Ces campagnes ont eu pour objectif de permettre au chercheur de mieux connaître les phénomènes, d'identifier les facteurs les plus pertinents.

1.22. Un domaine de recherche toujours d'actualité

La tendance actuelle de la recherche est de s'intéresser à la nature de la pollution véhiculée par les eaux pluviales. Afin de mieux maîtriser les variations des diverses concentrations en éléments polluants, ainsi que les facteurs influençant la charge polluante d'une eau pluviale, plusieurs campagnes de mesures ont été réalisées. Une de ces campagnes a pris place dans le cadre du programme d'étude du bassin d'orage, implanté sur le bassin versant urbain d'expérimentation de la commune d'ENTZHEIM, piloté par la direction de la recherche de l'E.N.G.E.E.S..

Le C.E.R.G.R.E.N.E. mène, et a mené, de nombreux travaux dans ce domaine (Marquet, 1993 ; Saget, 1995). Mais les campagnes de mesures restent assez peu nombreuses, d'assez courte durée et donc précieuses, compte tenu de leur coût. C'est le C.E.R.G.R.E.N.E. qui s'est d'ailleurs employé à mettre au point la base de données française "QASTOR" (Saget, 1995) concernant la qualité des rejets urbains par temps de pluie. Les mesures, les plus couramment employées et citées dans divers travaux, sont celles réalisées au cours de la Campagne Nationale de mesures qui a eu lieu de 1980 à 1982 à l'instigation du Service Technique de l'Urbanisme.

Ces campagnes de mesures lancées durant plusieurs années ont mis en évidence une **influence de la durée du temps sec qui précède la pluie étudiée** sur la quantité de pollution véhiculée par l'événement considéré. L'exploitation des résultats de ces campagnes a permis d'établir diverses équations souvent obtenues par des "régressions pas à pas" (en anglais "stepwise"), liant des paramètres de pollution (concentrations ou masses totales) à plusieurs paramètres à caractère plutôt hydrologique (débit, durée et volume ruisselé résultant de l'événement pluvieux, durée du temps sec précédant, nature pédologique du Bassin Versant...).

1.3. Etat des connaissances actuelles

1.31. Connaissances relatives à la pollution

1.311. Origine de la pollution

Les polluants qui se déposent par temps sec sur les surfaces urbaines ont des origines diverses. Ils peuvent provenir de la ville elle-même, ou parcourir de longues distances avant de se déposer. Les sources de dégradation de la qualité des eaux provenant des rejets urbains par temps de pluie sont multiples (Valiron et Tabuchi, 1992) :

- pollution d'origine atmosphérique,
- érosion du terrain naturel (jardins, parcs...), chantiers,
- végétaux (pollen, feuilles, branches...),
- engrais et herbicides,
- excréments d'animaux,
- usure des revêtements (voiries, trottoirs, parkings et surfaces imperméabilisées),
- produits de déverglaçage répandus périodiquement sur les voiries (sable, gravillon, sels de déneigement...),
- déchets divers jetés dans les rues,
- véhicules à moteur (gaz d'échappement, carburant, huile, pneumatique...),
- rejets chimiques et industriels,
- dépôts des réseaux d'assainissement unitaire.

L'entraînement de cette pollution se produit dès que la hauteur de pluie précipitée dépasse la quantité nécessaire au mouillage des surfaces (perméables et imperméables) et que le ruissellement commence. L'aptitude de la pluie à éroder les sols semblerait dépendre de sa granulométrie, c'est-à-

dire de la taille et de l'énergie cinétique des gouttes, et de son intensité instantanée sur des pas de temps très courts.

Cet ensemble de facteurs et de mécanismes peut être représenté schématiquement selon la Figure I.1.

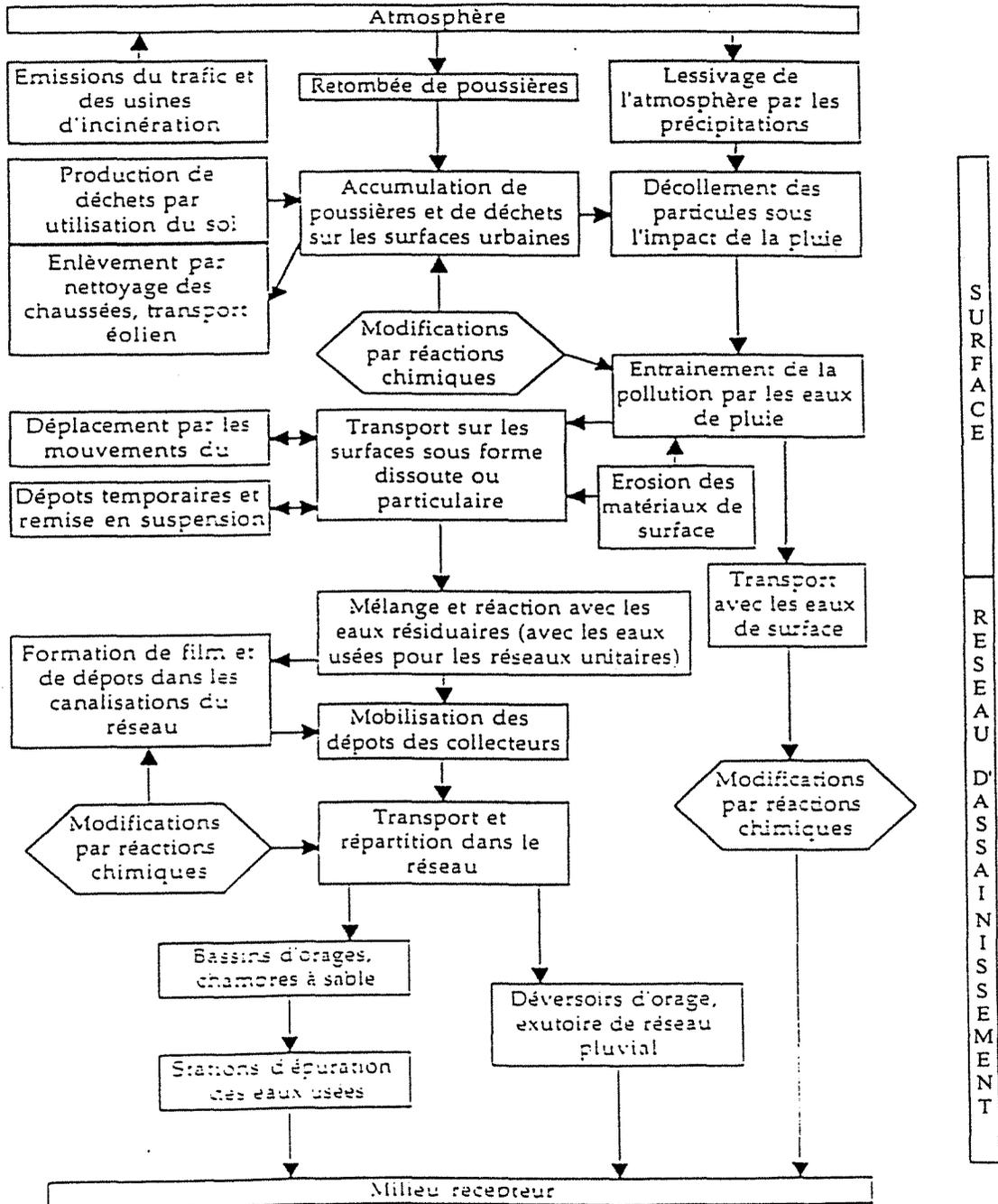


Figure I.1 : Circulation de la pollution en milieu urbain d'après Geiger (in Marquet, 1993).

La pollution du ruissellement pluvial urbain, est un phénomène fortement lié avec la croissance de l'urbanisation, dont l'importance est enfin reconnue. Chebbo (1995) a montré que les matières en suspension (MES) représentent une part importante de la pollution consécutive au

ruissellement urbain. Les particules vont se déposer lorsque les conditions hydrauliques le permettent ou dans les collecteurs posés à très faibles pentes. Elles peuvent alors être remises en suspension lors d'un événement pluvieux ultérieur.

1.312. Paramètres et effets de la pollution

Un rejet de matières organiques provoque, à partir d'un certain seuil, une désoxygénation du cours d'eau dans lequel il est déversé. Il en résulte un déséquilibre de la flore et de graves conséquences sur la mortalité piscicole (*indicateurs* : DCO, DBO₅).

L'apport de solides provoque l'ensablement des fonds, le colmatage des frayères et une augmentation de la turbidité de l'eau. Il joue également un grand rôle dans le transport d'autres vecteurs de pollution. Il contribue à leur propagation et au relargage des toxiques de manière différée dans le temps (*indicateur* : MES).

Les produits toxiques comme les hydrocarbures, les micro-polluants organiques et métalliques entraînent une mortalité ponctuelle de la faune et une dégradation à plus ou moins long terme de la flore (*indicateurs* : HAP, PCB, Pb, Zn, Cd...).

Les nutriments, azote et phosphore principalement, accélèrent l'eutrophisation des cours d'eau (*indicateurs* : NO₃⁻, P et PO₄³⁻).

Les germes pathogènes et les virus rendent l'eau impropre à la consommation et à la baignade et peuvent affecter les piscicultures et les conchylicultures (*indicateurs* : coliformes totaux, coliformes fécaux et streptocoques fécaux).

1.313. Quelques chiffres relatifs à la pollution

Du rapport de synthèse de la campagne de mesure expérimentale française de 1980-1982 (Hémain, 1985), il ressort que les charges entraînées au cours d'un événement sur des zones d'habitat de quelques dizaines d'hectares, équipées en séparatif, peuvent atteindre les valeurs mentionnées dans la deuxième colonne du Tableau I.1.

L'observation des pluies correspondantes montre qu'elles sont caractérisées par des hauteurs et/ou des intensités importantes souvent précédées par une durée de temps sec élevée. Cependant les débits engendrés par ces mêmes événements ont des périodes de retour qui bien souvent ne dépassent pas les deux ans. Ces événements ne seront donc pas considérés comme exceptionnels, comme ceux utilisés pour des dimensionnements hydrauliques d'ouvrages.

Une analyse qualitative a montré que les fortes concentrations étaient principalement observées après de longues durées de temps sec, et que les charges importantes sont généralement véhiculées par les événements dont le débit de pointe est élevé.

Ainsi les concentrations moyennes maximales sont de l'ordre de celles indiquées dans la troisième colonne du Tableau I.1, et les charges annuelles entraînées sont indiquées dans la quatrième colonne.

	<i>charges par événement</i> <i>tonnes</i>	<i>concentrations moyennes maxi.</i> <i>mg/l</i>	<i>charges annuelles entraînées</i> <i>t/an</i>
MES	3 à 7	1000 à 4000	20 à 40
DCO	1 à 3	600 à 1300	10 à 20
DBO₅	0,1 à 0,2	100 à 400	1 à 3

Tableau I.1 : Résumé des valeurs des paramètres observées lors de la campagne de mesure de 1982.

Les deux tableaux suivants issus de (Chebbo *et al.* 1995), donnent les ordres de grandeur des flux annuels (Tableau I.2) et des flux par événement pluvieux (Tableau I.3) provenant de la base de données QASTOR. Les estimations ont été effectuées à partir de 17 sites ayant des caractéristiques différentes, notamment leur surface active variant de 16 à 200 hectares. De plus, des sites équipés en réseaux séparatifs et unitaires ont été comparés à des sites équipés en séparatifs dit "pollués", il s'agit de réseaux séparatifs affectés de certaines anomalies, comme des branchements parasites.

		<i>Type de site</i>		
		<i>Séparatif</i>	<i>Séparatif pollué</i>	<i>Unitaire</i>
MES	masses (1)	17 à 200	41 à 680	24 à 14 100
	masses/surf.act (2)	1 000 à 7 400	1 700 à 6 700	1 200 à 4 400
	concentrations (3)	160 à 460	240 à 400	240 à 670
DCO	masses (1)	10 à 150	20 à 410	14 à 15 200
	masses/surf.act (2)	670 à 5 200	1 200 à 7 400	1 050 à 4 200
	concentrations (3)	80 à 320	180 à 470	350 à 570
DBO₅	masses (1)	1,5 à 15	3,8 à 120	5,9 à 6 500
	masses/surf.act (2)	100 à 520	240 à 1 400	780 à 1 500
	concentrations (3)	13 à 130	35 à 120	90 à 270

- (1) tonnes
(2) kg/ha act.
(3) mg/l

Tableau I.2 : Domaine de variation des masses annuelles totales et ramenées à la surface active et des concentrations moyennes annuelles.

		Type de site		
		Séparatif	Séparatif pollué	Unitaire
MES	masses (1)	1 500 à 10 500	2 300 à 16 200	1 500 à 14 400
	masses/surf.act (2)	80 à 550	80 à 180	24 à 190
	concentrations (3)	645 à 3 800	780 à 2 500	740 à 1 800
	% M annuelle	6 à 27	2 à 8	1 à 17
DCO	masses (1)	840 à 3 800	1 100 à 17 400	580 à 16 500
	masses/surf.act (2)	56 à 310	15 à 215	32 à 75
	concentrations (3)	500 à 1 500	900 à 2 700	840 à 1 100
	% M annuelle	5 à 28	5 à 10	2 à 5
DBO₅	masses (1)	175 à 580	160 à 7 700	55 à 62 300
	masses/surf.act (2)	8 à 90	10 à 39	7 à 31
	concentrations (3)	50 à 750	250 à 820	250 à 480
	% M annuelle	5 à 15	5 à 10	2 à 5

- (1) kg
(2) kg/ha act.
(3) mg/l

Tableau I.3 : Par événement, domaine de variation des masses les plus grandes, totales et ramenées à la surface active, des concentrations moyennes les plus grandes et de la masse la plus grande ramenée à la masse annuelle.

Valiron et Tabuchi (1992) donnent une comparaison théorique des rejets pluvieux par rapport aux rejets urbains en séparatif et en unitaire sur une agglomération théorique de 10 000 habitants (Tableau I.4).

	Séparatif			Unitaire			Pluviale		
	Concentration moyenne mg/l	Flux annuel tonnes	Flux journalier kg	Concentration moyenne mg/l	Flux annuel tonnes	Flux surverse unitaire kg	Concentration moyenne mg/l	Flux annuel tonnes	Flux déversé kg
MES	20-30	10-17	25-50	200-1000	40-200	270-800	100-1000	25-100	170-700
DCO	20-30	10-17	25-50	70-150	15-30	100-300	10-100	2,5-10	17-170
DBO₅	60-90	35-50	100-140	200-600	40-130	270-1300	50-600	10-50	70-350

Tableau I.4 : Comparaison théorique des rejets pour différents systèmes de collecte.

L'expérience prouve que ces valeurs sont tout à fait conformes à la réalité.

Ces indications, ramenées à l'hectare actif ou données en fonction de la population, permettent la comparaison à d'autres sites.

Dans ces trois tableaux, on se rend bien compte que les surverses unitaires sont plus chargées que les eaux pluviales et les rejets en séparatif.

1.314. La modélisation

La pollution des eaux pluviales est discontinue et se déverse dans le milieu naturel en un laps de temps très court.

Afin d'étudier des dispositifs de réduction et de traitement de la pollution des eaux pluviales, la recherche s'est très vite tournée vers la modélisation, malgré la connaissance plutôt sommaire des phénomènes impliqués. Ainsi dès 1979, Hémain (1991) recensait une quinzaine d'outils déjà élaborés. Mais, pour l'instant, aucune loi générale n'a pu être mise en évidence, sans doute en raison du grand nombre de paramètres intervenant dans les expressions et de leur variation quelques fois assez imprévisibles (nettoyage des chaussées, curage des réseaux). Seuls des algorithmes de portée locale calés à partir des mesures collectées dans des zones réduites peuvent être utilisés.

La plupart des études expérimentales menées jusqu'à ce jour (Carra, 1988 ; Marquet, 1993 ; Saget, 1995) donnent lieu au calage de modèles empiriques. Il s'agit généralement d'équations de régressions statistiques ajustées sur les observations puis utilisées en prévisionnel, souvent pour estimer les charges polluantes annuelles entraînées par les eaux de ruissellement sur le site étudié. Au sens statistique, la qualité de ces ajustements est irréprochable, mais aucune formulation ne peut être considérée comme la plus adéquate. Les valeurs, ainsi estimées, le sont parfois à $\pm 50\%$.

Servat (1984) teste d'autres modèles plus conceptuels sur les quatre bassins versants expérimentaux. Il conclut qu'en pratique, l'information disponible n'est jamais suffisante pour caler convenablement les modèles proposés.

L'exploitation de ces modèles s'avère décevante. Leur calage sur des données fiables et relativement nombreuses reste indispensable.

En 1985, à l'issue d'un séminaire OTAN consacré exclusivement à la pollution des eaux de ruissellement urbain, un nouvel axe prioritaire de recherche est défini : "la compréhension et la modélisation des processus et mécanismes d'accumulation des polluants et de transport par le ruissellement". En effet, même si les modèles sont nombreux, et pour certains déjà très anciens, tous reposent sur des concepts très simples : taux de production (en période de temps sec) constant ou à décroissance exponentielle, masse entraînée proportionnelle à la masse disponible et fonction du débit de ruissellement, équation d'érosion des sols....

Au début des années 1990, les américains finalisent un modèle simulant les écoulements en quantité et en qualité. Il s'agit du Storm Water Management Model (SWMM) dont les premières écritures datent de 1960 (Jewell, Adrian, 1978; Alley, Smith, 1981). Un système expert associé facilite le calage du modèle grâce à une comparaison des sorties du modèle avec les mesures réelles. Une procédure implantée dans le système, alimentée par une base de données enrichie au fur et à mesure

des expériences, permet de modifier certains paramètres ou même des équations des algorithmes de calcul.

En France, c'est FLUPOL qui voit le jour. Il permet de déterminer les débits et les flux polluants dans les réseaux urbains par temps de pluie à partir des caractéristiques de l'urbanisation. Ce modèle prend également en compte les dépôts dans les réseaux.

La reprise des dépôts, lors de l'écoulement de gros débits, a une importance dans la composition des eaux déversées, surtout lorsque l'on estime qu'en moyenne ces dépôts peuvent occuper 20 à 40 % des égouts (Valiron et Tabuchi, 1992). Parmi les paramètres jouant un rôle déterminant dans ce phénomène, on note la cohésion des dépôts qui augmente avec le temps et nécessite, du fait du tassement et de la masse, des forces de cisaillement de plus en plus élevées pour les remettre en suspension.

La modélisation de ce phénomène n'est pas simple bien que Stotz et Krauth l'aient étudié et aient proposé une formule (Stotz, Krauth; 1986).

Il semble donc que la connaissance actuelle des phénomènes et des variables explicatives reste encore fragmentaire, mais qu'un effort d'acquisition est fait.

1.32. Connaissances relatives à la pluviométrie

1.321. Quels liens entre la pluie et la pollution - aspect qualitatif

Comme cela a été brièvement évoqué au paragraphe 1.311., la pluie est un vecteur de transport de pollution avant même d'arriver sur le sol. Ainsi les oxydes de carbone, de soufre et d'azote constituent une fraction importante des gaz émis qui se transforment partiellement en acides par oxydation et abaissent le pH de la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère. C'est le phénomène des pluies acides. La totalité des éléments constitutifs de la pollution atmosphérique finit par retomber sur le sol, soit de façon accélérée avec les précipitations, soit directement.

La circulation atmosphérique due aux phénomènes météorologiques provoque une forte dispersion de la pollution avec parfois des transports sur de longues distances (sables du Sahara traversant la méditerranée).

Au début d'une précipitation, il y a tout d'abord une action de mouillage de la surface correspondant à une hauteur d'eau tombée d'environ 0,5 mm (Valiron et Tabuchi, 1992) qui ne se traduit pas par un écoulement. Pendant ce temps, il y a dissolution des éléments solubles et mise en suspension des dépôts qui viennent s'ajouter à la pollution atmosphérique.

Le ruissellement, auquel est associé le transport des particules précédemment remises en suspension, commence lorsque la quantité de pluie dépasse le seuil de mouillage. Ces phénomènes demeurent néanmoins complexes. L'entraînement des particules sera fonction de l'énergie des gouttes, de la vitesse d'écoulement et de la cohésion des dépôts qui dépend elle-même de la durée de

temps sec précédant l'épisode pluvieux. Suivant l'intensité de la pluie, l'entraînement peut même se transformer en érosion.

L'entraînement et le transport varient en fonction de caractéristiques du bassin versant (pente, érodabilité de la surface, ouvrage de transport,...) et, principalement, avec les paramètres hydrologiques suivants :

- la hauteur d'eau tombée,
- l'intensité de la pluie,
- la durée de l'épisode.

1.322. L'étude hydrologique - aspect quantitatif

L'étude des pluies de caractère extrême et, par conséquent, l'étude des intensités moyennes maximales s'apparentent à l'étude des crues d'averses. En effet, les grandes crues ont surtout pour origine des averses exceptionnelles par leur intensité, leur extension, leur durée ou leur succession rapprochée.

Ainsi, d'après Remenieras (1960), considérées sur une longue série d'années, les fortes averses persistant plusieurs jours sur de grandes étendues semblent se reproduire à intervalles plus ou moins éloignés, en suivant des modalités à peu près analogues. Cela suggère l'existence, dans certaines régions, de répartitions pluviométriques types correspondant à des situations météorologiques semblables. Ces similitudes s'expliquent notamment par la position géographique et le relief des bassins considérés, par les trajectoires habituelles des perturbations météorologiques ainsi que par des influences climatiques saisonnières.

Aussi des averses orageuses courtes, violentes et très localisées produisent, sur les petits bassins, notamment en montagne, des crues très pointues dont les débits maxima élevés peuvent provoquer de gros dégâts. Dans le nord de la France, l'ordre de grandeur d'une pluie très exceptionnelle est de 1 mm/min soit 166 l/s/ha. L'ajustement de lois statistiques à ces valeurs extrêmes a montré que ce type d'échantillon suit en général une loi de Gumbel (ou loi doublement exponentielle) dont les valeurs maximales peuvent souvent s'ajuster suivant une loi de Fuller, plus simple et plus proche de la loi de Gumbel pour les valeurs extrêmes.

Le comportement des pluies a donc été bien étudié du point de vue quantitatif et spatial par les hydrologues et les météorologues, mais les seules études portant sur les chroniques de temps secs se sont intéressées à leur répartition spatiale et au risque d'apparition de longues périodes sèches (Galloy *et al.*, 1982 ; Martin et Peltier, 1986). Néanmoins, personne à ce jour ne s'est encore intéressé à la caractérisation de la durée de temps sec en période de retour, ni à la caractérisation en terme de fréquence au dépassement du **couple temps-sec/épisode pluvieux**.

2. Objectifs de l'étude

Après avoir effectué ce rapide bilan des connaissances concernant la pollution des eaux de ruissellement pluvial, l'objectif de ce travail de recherche est d'établir une loi qui permettrait de caractériser un événement pluvieux sur une agglomération en terme de fréquence au non-dépassement, en intégrant une notion de pollution et non plus seulement une notion de volume d'eau tombée. Des études antérieures (Servat, 1984 ; Beyer, 1987 ; Carra, 1988 ; Bellefleur, 1989) ont montré qu'il existait une liaison entre les paramètres caractérisant la pluie, le temps sec et la pollution. L'aboutissement de cette démarche devrait donc contribuer à l'élaboration d'un nouveau mode de dimensionnement plus efficace des ouvrages d'assainissement en prenant mieux en compte la pollution. Ainsi, une meilleure rétention des substances polluantes, mises en suspension après un orage, suivi d'un traitement adéquat conduit à une préservation maîtrisée de l'environnement.

C'est une approche tout à fait nouvelle que cette étude se propose d'aborder. En effet, la caractérisation de la seule pluie ne suffit plus pour apprécier la rareté d'un événement vis-à-vis de la pollution véhiculée.

L'objectif est de caractériser tout d'abord les individus issus du "**couple**" composé, d'une **variable représentative de la pluie** d'une part, et de la **durée du temps sec** précédant cet événement pluvieux, d'autre part. Pour cela il s'agit donc d'étudier, le comportement des lois marginales des différentes variables décrivant la pluviométrie (ainsi que les durées de temps sec précédant les événements) en y ajustant une loi statistique. La fréquence de chacune des valeurs des variables pourra donc être déterminée ainsi que sa période de retour. Une approche statistique rapide, par le biais de régressions linéaires, permettra de mettre en évidence les paramètres prédominants dans la production de pollution.

Une modélisation simple de la pollution sur le site d'étude, en utilisant des modèles globaux, et la mise au point d'un générateur de pollution doivent permettre de caler une loi de fréquence pour la pollution, et de déterminer la période de retour d'un événement donné.

Deux valeurs sont recherchées plus particulièrement, celle correspondant à une **période de retour d'un événement décadaire**, susceptible de se produire théoriquement en moyenne tous les dix jours, et celle correspondant à la **période de retour maximale observée**, si possible décennal, si pour autant cette valeur peut être atteinte sur un bassin versant urbain. Dans le cadre du dimensionnement d'ouvrages d'assainissement, il est aussi important de connaître l'une que l'autre, car il est primordial de pouvoir maîtriser les événements dont la fréquence d'apparition est comprise entre ces deux périodes de retour.

Ayant déterminé les lois que suivent les différentes variables de pluies et le temps sec, il s'agit d'étudier le couple : temps sec précédant/pluie, afin d'en déterminer une loi de fréquence.

La comparaison avec les courbes de fréquence déterminées par le modèle pourra peut-être permettre l'introduction d'hypothèses simplificatrices.

Si les résultats sont satisfaisants, cette technique pourrait être vérifiée et validée sur d'autres bassins versants extraits des deux autres régions de France métropolitaine (au sens de la circulaire de 1977, les trois régions étant représentées sur la Figure 1.2) de façon à ébaucher une généralisation des résultats sur l'ensemble du territoire français métropolitain.

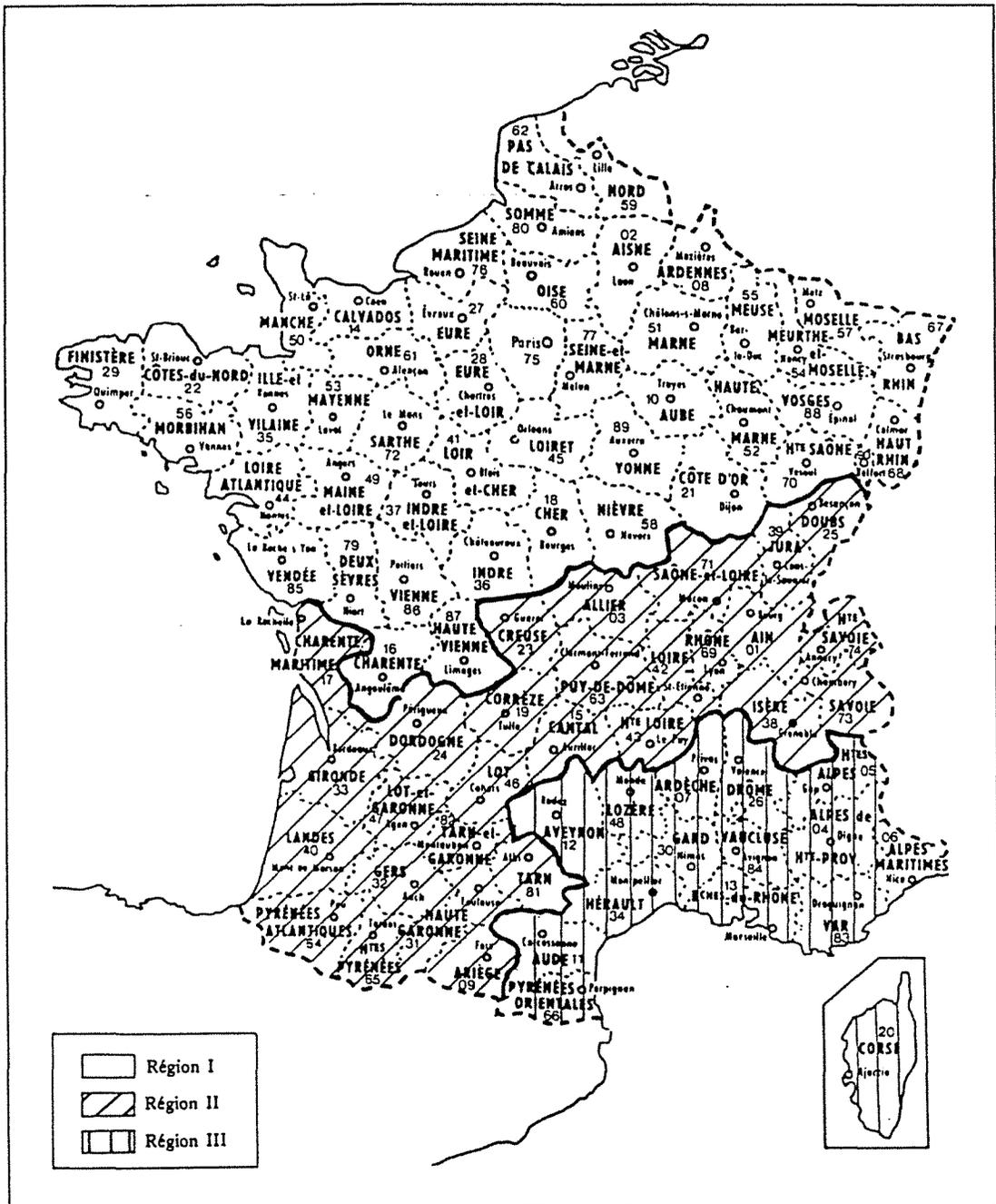


Figure 1.2 : Détermination des régions de pluviométrie homogène, annexe II de la circulaire interministérielle de 1977.

3. Quelques compléments de réflexion en guise de conclusion

L'effet sur le milieu naturel des rejets urbains par temps de pluie est important malgré leur caractère discontinu. En regard des efforts réalisés pour la maîtrise et le traitement des eaux usées domestiques, il est important de rechercher des solutions à ce problème et une coordination des actions, tant du point de vue de la recherche, que du point de vue réglementaire.

Si la collecte ne pose pas de problème, l'évaluation des flux polluants issus d'orage est délicate. La réalisation d'ouvrage de rétention s'appuie sur divers précieux modèles mais ne peut en aucun cas se passer de mesures sur site.

La connaissance actuelle des modèles permet une évaluation encore trop sommaire de la pollution. Une poursuite des recherches pour rendre ces modèles facilement transposables d'un site à l'autre s'impose.

CHAPITRE II - DONNEES UTILISEES

CHAPITRE II - DONNEES UTILISEES.

L'expérimentation constitue l'étape clé de la modélisation et, comme le souligne Hémain (1991) dans ses travaux, c'est aussi la plus coûteuse et la plus délicate. En principe, elle découle des objectifs visés et doit être cohérente avec l'approche modélisatrice envisagée. Dans le cas présent, la campagne de mesure utilisée dans ce travail a été menée antérieurement à cette étude, toutefois les objectifs qui avaient été fixés restent concordants avec les préoccupations et les besoins liés à ce travail.

1. Quels étaient les sites disponibles?

Bien avant la publication de sa thèse, nous avions connaissance des travaux menés par A Saget (1995) et nous savions quels sites avaient retenu son attention pour la constitution de sa base de données "QASTOR", sur la qualité des rejets urbains par temps de pluie.

17 sites sont disponibles avec des caractéristiques différentes de l'un à l'autre en termes de surface et de pente moyenne de bassin versant, de temps de concentration ainsi que d'habitat et de densité de population. En outre, la durée des enregistrements sur ces sites est comprise entre 11 et 16 mois, réalisés entre 1974 et 1983.

Etudié par l'ENGEES depuis 1985, le site d'Entzheim présente plus de deux années de mesures mais, compte tenu de sa complexité, il n'a pas pu être introduit simplement dans cette base.

L'objectif de ce travail est d'établir une méthode de caractérisation simple de la pollution transposable sur d'autres sites, il a été décidé de mettre au point la méthode sur Entzheim, dans la perspective, si possible, de la confirmer et de tenter de la généraliser, sur les sites d'Aix Z.U.P. et Nord, sur Maurepas et Les Ulis.

2. Description du site d'Entzheim

2.1. Situation d'Entzheim

Les données utilisées dans ce travail ont été recueillies sur le site du bassin d'orage de la commune semi-urbaine d'Entzheim. Ce village, de 1650 habitants au moment de la campagne de

mesure, est situé dans la plaine du Rhin en France à une vingtaine de kilomètres au sud-ouest de Strasbourg (Figure II.1).



Figure II.1 : Localisation de la commune d'Entzheim.

Le village est constitué d'un noyau central ancien, avec encore quelques fermes, et de plusieurs lotissements de constructions récentes (Figure II.2). Il n'existe pas d'industrie sur ce site, l'activité artisanale y est faible et l'agriculture reste une activité importante.

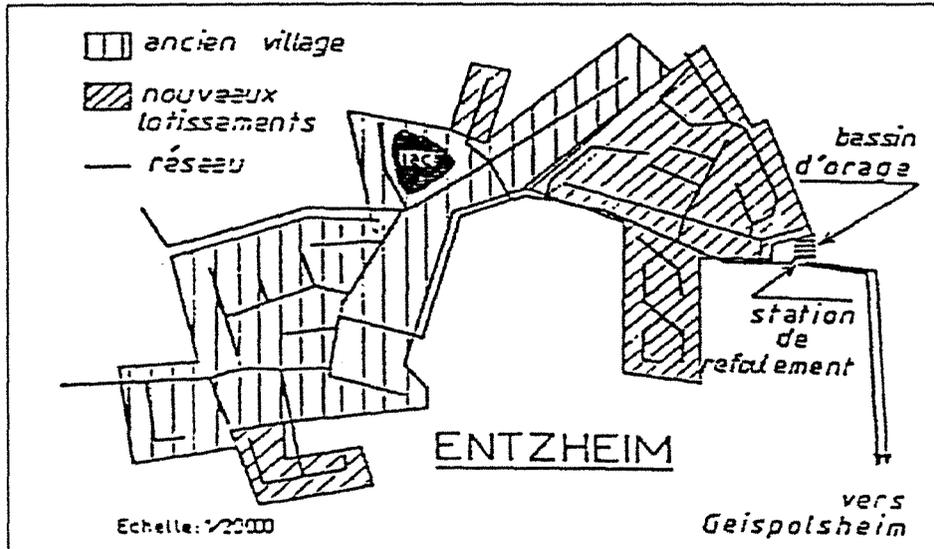


Figure II.2 : Schématisation du village et du réseau d'assainissement d'Entzheim d'après Arières (1985).

D'un point de vue géologique, le village est construit sur des alluvions du quaternaire (graviers) que l'on trouve entre 1,10 et 1,70 mètres de profondeur dans lesquelles s'écoule une importante nappe phréatique.

D'un point de vue climatique la région est soumise à un climat continental avec une nette distinction entre été et hiver.

2.2. Description sommaire du site de mesure

2.21. Le réseau d'assainissement

Sur la commune d'Entzheim, le réseau d'assainissement est de type unitaire, construit dans les années 1968. Les eaux traversent le bassin d'orage et sont récupérées ensuite dans une bache de reprise pour être refoulées sur la commune voisine. Les caractéristiques du réseau ont été étudiées par Artières (1985). Le plus long chemin de l'eau dans les égouts est de 1737 m et la longueur totale du réseau est de 8816 m. Il n'existe pas de bassin d'orage intermédiaire jusqu'au bassin d'orage, site des mesures de pollution sur Entzheim.

Le réseau a une pente moyenne faible (3,1 ‰) et présente un certain nombre de tronçons avec des pentes négatives pouvant atteindre -7,5 ‰. Les pentes les plus fortes atteignent 2 ‰, mais sur de très faibles longueurs. Ces caractéristiques occasionnent une importante formation de dépôts.

L'étude des vitesses d'écoulement faite par Beyer (1987) montre qu'en temps sec, il n'y a pas d'autocurage des conduites. Ces conditions ne sont atteintes que par temps de pluie. Dans les conduites principales, une pluie d'intensité de 3 mm/h satisfait à ces conditions. Pour que l'ensemble du réseau soit autocuré, une pluie de 30 mm/h est nécessaire.

2.22. Le bassin d'orage

Le bassin d'orage est situé à la sortie du réseau de collecte des eaux usées de la commune d'Entzheim. L'intégralité des eaux domestiques et pluviales transitent par ce bassin. C'est précisément au niveau du bassin d'orage qu'ont été enregistrées les données de pollution. La description, faite par Bellefleur (1989) de cet ouvrage, est celle d'un ouvrage assez complexe constitué de deux parties distinctes (voir Figure II.3).

La première est le bassin de pollution. Il est traversé par le débit de temps sec qui tombe ensuite dans une bache de pompage. Pour éviter les dépôts lors d'un tel fonctionnement, le fond est parcouru par une rigole en serpent.

La seconde partie est constituée de trois bassins de pluie, fonctionnant en cascade. Ces bassins se vident dans une seconde bache de pompage.

Le fonctionnement du bassin d'orage d'Entzheim, au cours d'un épisode pluvieux, est celui d'un bassin piège à connexion directe (FNDAE, 1988). Lorsque tous les bassins sont pleins, le débit excédentaire est déversé dans le milieu naturel par un trop-plein.

Du fait de sa conception, la vidange du bassin se réalise sans laisser de dépôts.

Les enregistrements utilisés pour définir la pollution apportée par un événement pluvieux sont ceux qui ont été effectués au niveau du point ① de la Figure II.3.

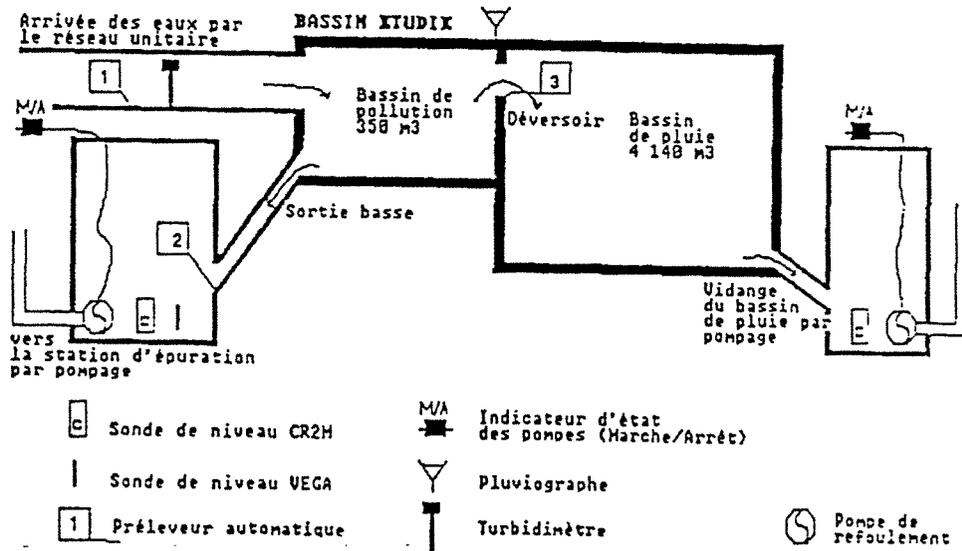


Figure II.3: Equipement du bassin d'orage d'Entzheim

2.23. Equipement en matériel de mesure

L'installation en 1987 d'une station de mesure du flux polluant à Entzheim répondait à deux objectifs :

- ⇒ caractériser les pollutogrammes de sortie du réseau par temps sec et par temps de pluie,
- ⇒ établir les bilans des flux transitant par le bassin de pollution afin de mesurer l'efficacité de cet ouvrage.

La station de mesure a été mise en oeuvre par Beyer (1987), tandis que Carra (1988) a exploité les premières mesures, enregistrées entre mai 1987 et mars 1988. D'autres enregistrements ont été réalisés par la suite et les mesures exploitées dans cette étude concernent la période de mai 1987 à novembre 1988, soit 19 mois au total de mesures.

La station de mesure a donc été équipée de façon à pouvoir déterminer plusieurs paramètres :

- ⇒ pluviométrie sur le site,
- ⇒ débits d'entrée, de sortie et de surverse du bassin de pollution,
- ⇒ concentrations en polluants à l'entrée, à la sortie et à la surverse du bassin.

L'évaluation de ces paramètres s'est faite au moyen d'un ensemble de capteurs installés sur le site du bassin d'orage.

- ⇒ la pluviométrie a été enregistrée par un pluviographe,
- ⇒ les débits de sortie et de surverse du bassin de pollution sont mesurés par des sondes de niveaux,
- ⇒ les concentrations de polluants ont été déterminées par l'analyse d'échantillons prélevés de façon automatique, en l'espace de quelques secondes, à l'entrée, à la sortie et à la surverse du bassin.

L'ensemble des capteurs et des préleveurs, ainsi que le pluviographe, ont été reliés à un micro-ordinateur installé sur place. L'équipement informatique assurait le stockage de l'information, un asservissement permettait de consulter les données et de donner des ordres de prélèvement à distance.

2.3. Description et fonctionnement du bassin versant

➤ *Coefficient d'imperméabilisation et coefficient d'apport*

La prospection réalisée par Artières (1985) conclut à un coefficient global d'imperméabilisation de 39 %, moyenne pondérée entre le coefficient d'imperméabilisation dans l'ancien village, qui oscille de 40 à 80 %, et celui des lotissements et zones résidentielles qui varie de 10 à 40 %.

L'évaluation du coefficient de ruissellement sur ce bassin versant, rapport entre le volume de pluie tombée sur la surface du bassin et le volume d'eau ruisselé, donne une moyenne de 60 % et un écart type de 20 %. Ces fortes variations sont probablement dues aux incertitudes de mesures.

➤ *Surface et pentes*

Ce bassin se caractérise donc par une petite superficie (40 ha) et par une pente du terrain naturel moyenne très faible (0,002 m/m), comparé à d'autres bassins étudiés (Saget, 1995).

Ceci explique que la pente moyenne du réseau (0,0031m/m) est faible.

➤ *Temps de concentration*

Le temps de concentration est le temps nécessaire à une goutte d'eau tombant et ruisselant dans la zone la plus éloignée du bassin versant pour arriver à l'exutoire. Pratiquement la mesure de ce temps est assez difficile, et il est courant de considérer qu'il est sensiblement égal à la durée écoulée entre la fin de la pluie et la fin du ruissellement, estimée à partir des hydrogrammes. Cette valeur varie avec la nature et la durée de la pluie.

Dans le cas présent, cette durée est de l'ordre de deux heures pour des pluies d'intensité plutôt faible, ce qui correspond à une vitesse moyenne d'écoulement de 0,3 m/s. Cette durée semble élevée, car par la méthode de calcul élaborée par Desbordes (1984), le temps de concentration ne serait qu'à peine d'une heure pour une pluie décennale (Bellefleur, 1989).

En tout état de cause, on retiendra que le temps de concentration pour des pluies courantes doit avoisiner une heure sur ce bassin.

➤ **Pluviométrie**

Giersch (s.d.) a observé au cours de ses travaux sur les données du poste météorologique d'Entzheim-aéroport que :

⇒ la durée moyenne des pluies est de 75 min avec une intensité moyenne de 13 l/s/ha.

⇒ la durée moyenne de la phase intense est de 20 min avec une intensité moyenne de 37 l/s/ha.

Carra (1988) a, quant à lui, observé que deux événements pluvieux donnent lieu à des pollutogrammes distincts dès lors qu'ils sont séparés d'au moins 8 heures (0,3333 jour).

Pour les raisons évoquées précédemment, et connaissant le temps de concentration, nous avons retenu les intensités moyennes maximales sur 20 minutes et sur une heure comme variables décrivant la pluie. En outre, deux événements pluvieux ont été considérés comme distincts lorsqu'ils sont séparés par au moins un laps de temps sec de 8 heures.

➤ **Production de pollution**

Nous avons choisi de travailler exclusivement sur les Matières En Suspension (MES), car elles sont un bon indicateur de la pollution puisqu'elles fixent d'une manière générale jusqu'à 80% de la pollution d'après Chebbo (1992). Cependant, les Matières En Suspension sont une grandeur difficile à mesurer.

Les précédents travaux réalisés sur Entzheim (Artières, (1985); Beyer, (1987); Carra. (1988)), montrent que les MES se déposent dans le réseau au cours des premiers jours de temps sec, jusqu'à "saturation" des sites de dépôts qui est atteinte au bout de dix jours environ. La masse se déposant par ce biais a été évaluée à 400 voire 500 kg.

Le bilan annuel effectué par Artières sur le transport solide dans le réseau montre que la masse de MES entrant est de 51 t/an et qu'il s'en dépose 18 t. Il a également montré que la masse de sédiments remise en suspension au cours d'événements moyens (400 à 500 kg) ne représente que 2 à 3 % du dépôt annuel. Le dépôt ne serait donc mobilisé que par des événements conduisant à un écoulement assez intense. C'est une des raisons pour laquelle les dépôts n'ont pas pu être modélisés (voir Chapitre IV 2.22).

2.4. Caractéristiques du Bassin Versant d'Entzheim

Les principales caractéristiques de ce bassin versant sont résumées dans le Tableau II.1.

CARACTERISTIQUES DU BASSIN D'ENTZHEIM	
Nombre d'habitants	1650
Surface du bassin versant	environ 40 ha
Urbanisation	peu dense, sans industrie
Coefficient d'imperméabilisation	0,39
Pente moyenne du terrain naturel	0,002 m/m
Temps de concentration	environ 1 heure

Tableau II.1 : Résumé des principales caractéristiques du bassin d'Entzheim.

3. Choix des variables

3.1. Les variables couramment utilisées

3.1.1. En hydrologie

La pluie peut être assimilée à un processus aléatoire p , dont l'évolution est décrite par des lois de nature stochastique. Le processus p , découpé en pas de temps peu importants, est un phénomène intermittent composé d'une succession d'états secs et d'états pluvieux (Figure II.4). Si l'on considère, sur une longue période, la série des valeurs consécutives de p on s'aperçoit qu'il est constitué, d'une part, de longues périodes sèches pendant lesquelles il ne pleut pas, et d'autre part, de périodes plus ou moins durables pendant lesquelles l'activité pluvieuse, sans être continue, reste notable. On a dans la série, une juxtaposition de "paquets" de natures différentes.

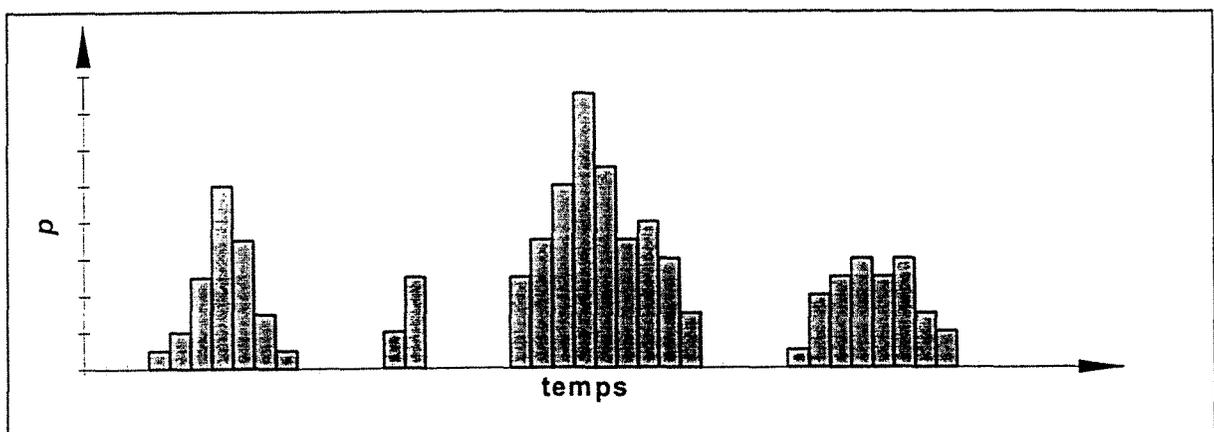


Figure II.4 : Distribution de la pluie au cours du temps.

S'appuyant sur les travaux de Croley (1978), Tourasse (1981) énonce dans son étude une façon de décrire un épisode pluvieux. Il considère qu'un épisode pluvieux est une succession d'averses pluvieuses séparées ou non par de courtes périodes sans pluie.

La description qu'il fait de l'événement (Figure II.5), se fait au moyen de 6 variables aléatoires:

- ⇒ (1) le nombre NA d'averses à l'intérieur d'un épisode,
- ⇒ (2) l'intervalle de temps ITEA entre deux averses,
- ⇒ (3) la durée DA exprimée en heures d'une averse,
- ⇒ (4) son volume HPA ou quantité d'eau tombée pendant l'averse,
- ⇒ (5) la position HEMA du maximum à l'intérieur de l'averse,
- ⇒ (6) le rapport RPA, exprimé en pour cent, de la pluie tombée pendant l'heure du maximum sur le volume total de l'averse.

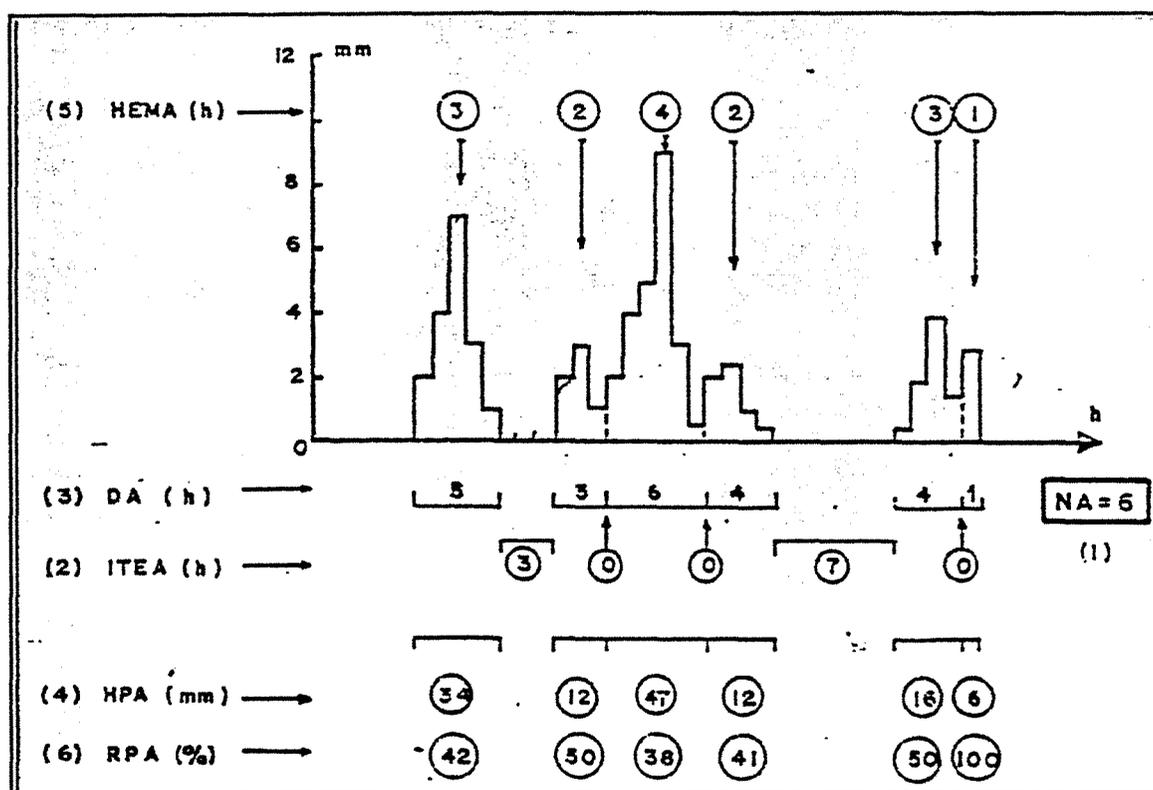


Figure II.5 : Description d'un événement pluvieux d'après Tourasse (1981).

Dans ce schéma très proche de celui proposé par Croley. (1978), il définit une averse comme étant une suite ininterrompue d'heures de pluie ne présentant qu'un seul maximum. En cas d'averses consécutives le minimum relatif qui les sépare est affecté arbitrairement mais systématiquement à la première des deux averses. Chaque averse est définie par sa durée, son volume et sa forme (position du maximum par rapport au volume total de l'averse).

3.12. En assainissement

Valiron et Tabuchi (1992) répertorient les paramètres nécessaires à la description d'un événement pluvieux pour un bassin donné. Cette description se fait donc au moyen des paramètres suivants :

> pour la pluie

- ⇒ la hauteur totale de pluie tombée,
- ⇒ l'intensité et le hyétoگرامme,
- ⇒ la durée de l'événement,
- ⇒ l'heure de début,
- ⇒ la durée de temps sec avant l'orage.

De plus, suivant l'importance en superficie de la zone concernée, il faut prendre en compte les données d'un ou plusieurs sites de mesures afin de pouvoir calculer les effets spatio-temporels de la pluie.

> pour le ruissellement

- ⇒ le débit de base,
- ⇒ le débit pendant l'épisode pluvieux,
- ⇒ le volume total.

> pour la pollution

Pour les MES, la DCO, la DBO₅, l'azote et le phosphore, ainsi que les métaux lourds (Cu, Pb, Zn,...), il est nécessaire de connaître :

- ⇒ la concentration avant l'épisode,
- ⇒ la concentration pendant l'épisode,
- ⇒ le flux,
- ⇒ la granulométrie pour les MES,
- ⇒ la vitesse de chute des particules (Chebbo, 1995)

On retrouve des descriptions d'un événement plus ou moins personnalisées dans différentes études (Servat, 1984; Carra, 1988; Marquet, 1993; Saget, 1995....). Malheureusement, qu'il s'agisse des variables de pluviométrie ou de pollution, on ne retrouve que peu de variables communes d'une étude à l'autre, ce qui rend les comparaisons entre les divers travaux très difficiles.

3.2. Les variables retenues

3.2.1. Pluviométrie

Nous avons choisi de ne retenir que des variables faciles à obtenir à partir des enregistrements d'un poste pluviographique.

➤ *Le Temps sec (TS)*

La *durée de temps sec* a été définie comme étant le laps de temps séparant deux événements pluvieux en considérant une notion de seuil pour la hauteur d'eau tombée. En effet, comme le soulignent Valiron et Tabuchi (1992), on ne peut considérer qu'il y a ruissellement qu'à partir d'un certain seuil de pluie pendant une durée donnée. Ils fixent ce seuil à 0,5 mm. Nous choisirons de retenir une valeur de 1mm pendant une heure, pour considérer qu'un ruissellement s'opère. Concrètement cela revient à négliger en moyenne une dizaine d'événements par an.

Nous n'avons pas introduit la notion d'averse comme le préconise Tourasse (1981). Nous avons considéré que deux événements étaient indépendants vis-à-vis de la pollution s'ils étaient séparés de plus de huit heures. Cette durée a été déterminée expérimentalement sur le bassin par Carra (1988). Cette variable est exprimée en *jours*.

➤ *La Pluie*

Notons que l'objectif n'est pas ici de construire un générateur d'averses, comme l'a fait Tourasse (1981). Il s'agit de définir les variables qui ont la plus forte incidence sur la pollution. Six variables plus ou moins dépendantes ont été retenues pour caractériser la pluviométrie (Figure II.6). Il s'agit de :

↳ **Durée évt** : *durée de l'événement pluvieux*, sachant que deux événements pluvieux sont considérés comme indépendants s'ils sont séparés de plus de 8 heures de temps sec, au sens de la définition ci-dessus. Ainsi, plusieurs averses peuvent faire partie d'un même événement et le temps sec compris entre ces averses est inclus dans la durée de l'événement. En effet, du point de vue de la pollution deux averses espacées de moins de 8 heures ne conduisent pas à des pics de pollution distincts et font donc partie du même événement. Cette variable est exprimée en *jours*.

↳ **Htot** : *hauteur totale de pluie*, tombée pendant la durée de l'événement pluvieux. Cette variable est exprimée en *mm*.

↳ **I60** : *intensité moyenne maximale (Imoymax) pendant une heure*, ce qui correspond au temps de concentration du bassin et également à la durée moyenne des événements présentant un caractère orageux, d'après les observations faites sur ce bassin par Giersch (s.d.). Le caractère orageux est défini comme une pluie dont la phase intense est supérieure à 15 l/s/ha (5,4 mm/h). Cette variable a été exprimée en *mm/h*.

↳ **I20** : *intensité moyenne maximale pendant vingt minutes*, exprimée en *mm/h*. La durée de 20 minutes sur ce bassin correspond à la durée moyenne de la phase intense des pluies d'une

intensité supérieure à 15 l/s/ha. Cette valeur est couramment admise dans la région comme étant celle qui mobilise le maximum de pollution.

↳ **I5**: intensité moyenne maximale pendant cinq minutes, exprimée en mm/h, considérée encore comme valeur instantanée maximale.

↳ **Imoy**: intensité moyenne de l'événement, soit la hauteur totale divisée par la durée de l'événement ($H_{tot}/durée\ evt$). Cette variable a été exprimée en mm/h.

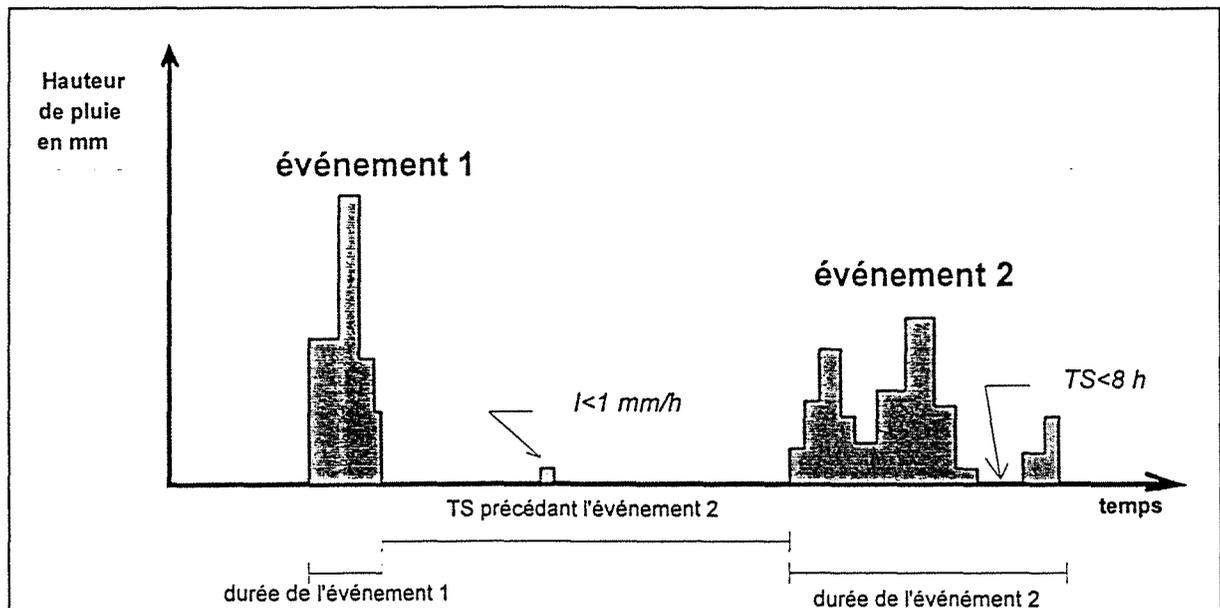


Figure II.6 : Description du découpage en événements de la chronique de pluviométrie de pluie et de temps sec retenu.

3.22. Pollution

Pour chaque événement, la description des caractéristiques des MES a été réalisée à l'aide de quatre variables. Il s'agit de :

↳ **MES_{tot}** : la masse totale exprimée en kg produite à l'issue de l'événement pluvieux. Elle résulte de la somme des flux élémentaires calculés sur chacun des pas de temps de la durée du ruissellement.

↳ **MES_{max/h}** : la charge maximale horaire en kg/h, correspondant à la charge maximum transportée pendant une heure. Notons, au passage, que ce flux maximum correspond pour la plupart des événements au pic de concentration et non pas au pic de débits.

↳ **MES_{moy}** : la concentration moyenne exprimée en mg/l, résulte de la division de la masse totale par le volume total ruisselé.

↳ **MES_{max}** : la concentration maximale en mg/l, correspond à la valeur maximale enregistrée lors de l'épisode de pollution.

Aucune considération de seuil granulométrique n'a été retenue pour la discrétisation des événements, quelle que soit la variable retenue.

4. Extraction des données

4.1. Pluviométrie

L'étude de la pluviométrie du site a été réalisée à partir des données du poste météorologique d'"Entzheim aéroport" situé à proximité du site d'étude, soit à moins d'un kilomètre à vol d'oiseau. Nous avons postulé que le comportement pluviométrique de cette station d'enregistrement météorologique était représentatif de celui de l'ensemble du bassin versant de la commune d'Entzheim, en considérant que toutes variations spatiales sur le site étaient négligeables.

L'acquisition et la validation des données ont été réalisées par le bureau d'étude de la DDAF du Bas-Rhin pour la nécessité de divers travaux. Le dépouillement à pas de temps variable fin avec une précision de la minute, et la saisie informatique des informations relatives à cette station ont été effectués pour la période de février 1968 à avril 1978. Malheureusement ces données brutes n'ont pas pu être récupérées sur support informatique faute de compatibilité de format. C'est pourquoi, au cours des travaux préliminaires à cette étude (Stieber, 1993), une base de données a été créée sur le progiciel "Open Access II" afin de simplifier la ressaisie des données à partir des listings. Les fichiers ainsi obtenus ont pu être rapatriés sur le tableur "Excel 5.0" sous Windows pour les besoins de ce travail. Il s'agit de 11 fichiers, d'environ 6000 lignes chacun, qui ont ainsi été récupérés. La constitution des fichiers nécessaires aux traitements de données a été réalisée à partir de ces derniers. Dans ces fichiers la pluviométrie est donnée par : la hauteur totale de la pluie et son intensité, pas à pas, au cours de l'événement. Chaque pas de temps, variable, est représentatif d'un segment de droite au cours duquel l'intensité de la pluie a été considérée constante. A l'aide de macro-commandes, les diverses variables ont été extraites, événement par événement.

Cette station est toujours en service et existe depuis la fin de la guerre. Il avait été envisagé de compléter le dépouillement à pas de temps fin de cette station, de façon à disposer d'un maximum d'informations pour faire une étude statistique, la plus exhaustive possible. Pour cela, il aurait fallu pouvoir disposer des bandes d'enregistrement que détient Météo France. Renseignement pris auprès des divers services, il s'est avéré impossible, à l'heure actuelle, de disposer des données brutes d'une station, ni d'en faire ressortir les "archives papiers" pour cause d'informatisation des données. Les seules données accessibles sont celles traitées par Météo France, qui ne correspondent pas aux besoins de cette étude.

C'est donc sur les 10,25 années de données, sans lacunes, que la partie statistique de cette étude a été réalisée.

4.2. Pollution

Les données de pollution disponibles émanent de la campagne de mesure réalisée sur le bassin d'orage de 1987 à 1989 par Beyer (1987) et Carra (1988).

La pluviométrie utilisée pour l'étude de la pollution a été mesurée à l'aide d'un pluviographe Précis-Mécanique à auget basculeur, installé sur le site même, dont chaque auget correspond à 0,1 mm d'eau par m².

Les concentrations en solides en suspension ont été mesurées par analyse d'échantillons obtenus par des préleveurs automatiques ISCO à 24 flacons. Les prélèvements ont été effectués à raison d'un échantillon pour 50 m³ écoulés, soit par multiplexage (plusieurs prélèvements individuels regroupés dans un seul flacon représentant 50 m³ écoulés), soit en un seul prélèvement.

La majorité des échantillons ont été prélevés de façon instantanée. Pour quelques événements pluvieux, le prélèvement a été multiplexé. On dispose alors d'une concentration moyenne sur la durée du multiplexage. Le prélèvement instantané présente l'avantage de suivre plus finement l'évolution des concentrations.

L'ensemble des données a été recueilli sur un ordinateur (type PC-XT) qui a permis le contrôle et l'asservissement des différents capteurs et instruments de mesures. La reprise des divers programmes de lecture des données, qu'avait écrits Beyer (1987) en TURBO PASCAL, a permis le rapatriement des fichiers de données brutes de pollution et de pluviométrie pour chaque séquence d'enregistrement sous Excel. Les séquences d'enregistrement sont au nombre de 118, dont seulement 64 comportant des mesures de pollution. Pour chaque séquence d'enregistrement, les données qui nous intéressent sont stockées dans deux fichiers :

- BO_ENTZ.xxx contenant les données de pluviométrie et les dates des prélèvements de pollution.

- ANA_DATA.xxx contenant les résultats des analyses de pollution aux différentes dates.

Afin d'extraire les informations avec le maximum de précision, ces fichiers ont fait l'objet d'une nouvelle analyse. Le tableau joint en Annexes II résume les caractéristiques des séquences d'enregistrement. Ce travail laborieux de manipulation de fichiers et de traitement de données a été réalisé sous Excel-5.0 au moyen d'un certain nombre de macro-commandes. Après conversion, les fichiers de pluviométrie et de pollution ont été rassemblés en un seul. Ce sont ces fichiers qui ont permis d'établir pour chaque événement une fiche signalétique, et une représentation graphique de la pluviographie ainsi que des pollutogrammes. Un exemple de ces fiches, pour l'événement 105.1, est donné par la Figure II.7 et les graphiques correspondants par la Figure II.8. Sur les 64 événements contenant des données de pollution par temps de pluie, 50 seulement se sont révélés exploitables. Après un examen détaillé des événements, il n'a été possible d'en retenir que 38 pas toujours consécutifs et de ce fait non exhaustifs de la période observée. L'exclusion des autres événements résulte, soit de lacunes trop importantes dans les données de divers paramètres, soit encore d'incohérences entre-eux témoignant de dysfonctionnements ponctuels des appareils de mesures.

Pour chacun d'eux, on dispose de la pluviométrie et des données de pollution concernant les MES mais aussi pour la DBO₅, la DCO, le NTK, et le PO₄³⁻.

Bien que disposant de l'ensemble des mesures, ce travail préalable d'analyse et de mise en forme a été indispensable avant de pouvoir procéder à un traitement de données et à un calage de modèle. Cette étape, bien que banale, représente plusieurs semaines de manipulation et d'extraction de données.

Le tableau II.2 résume les caractéristiques de ces 38 événements.

5. Notions d'incertitude sur les enregistrements

L'analyse critique des données est un préalable à l'étude de tout phénomène hydrométéorologique quelconque. Réalisée sur l'ensemble des données utilisées dans ce travail, elle vise à détecter des erreurs plus ou moins évidentes. Ces erreurs peuvent concerner la lecture, la transcription, la défaillance d'un instrument et sa localisation, ou le changement brusque du phénomène.

➤ *Paramètres de pluviométrie*

La pluviométrie, qu'il s'agisse de celle enregistrée à la station de mesure de l'aéroport ou de celle enregistrée à la station du bassin d'orage pendant la campagne de pollution, a été mesurée avec une précision de 0,1 mm pour les hauteurs d'eau. Les mesures ont été effectuées toutes les 2 minutes sur la station de mesure du bassin d'orage.

➤ *Paramètres de pollution*

Le dispositif d'acquisition et d'extraction des concentrations des solides en suspension a été décrit respectivement aux paragraphes 2.23 et 4.2.

Les concentrations en polluants ont été déterminées par l'analyse d'échantillons prélevés de façon automatique. En période de pluie, le préleveur a été asservi au débit. Il a été installé de façon à assurer une bonne représentativité de l'échantillon. L'incertitude liée à la mesure des concentrations a été évaluée entre 5 et 10%, par Beyer (1987). La précision de la mesure dépend directement de la concentration et augmente avec celle-ci.

DESCRIPTION DE L'EVENEMENT N°105.1

PLUVIOMETRIE :

Durée du temps sec précédant la pluie : 0 (*) + 3,6545 jours (*)
 Hauteur d'eau tombée pendant la durée de temps sec : 4,5 dixième de mm

Date de début de l'événement : 70,9045 jours

Date de fin de l'événement : 71,5599 jours

Quantité de pluie tombée durant la période : 10,2 mm

Intensité maximale instantannée : 11,4443 mm/h

Intensités moyennes maximales sur :

- 5 mn : 7,6420 mm/h
- 10 mn : 4,7207 mm/h
- 20 mn : 3,5926 mm/h
- 1 heure : 2,2320 mm/h

Débit maximum : 47,7 l/s

Volume total écoulé : 1 405,5 m³

POLLUTION :

	MES	MVS	DCO	NTK	PO4
Cmoy (mg/l)	208,5	54,8	208,5	16.5	12.5
Cmax (mg/l)	1122	274	686	41.9	35
charge max/h (kg/h)	60	11	46	3	2
masse totale (kg)	293	77	293	23	18

(*) : Introduction de données Météo France.

Figure II.7 : Exemple de fiche signalétique pour l'événement 105.1.

N.B.: Les données de base résultent de calculs, et l'utilisation de ces valeurs nous conduit à les introduire dans des équations, c'est la raison pour laquelle elles sont données avec un nombre de chiffres significatifs élevés. Seuls les résultats sont arrondis.

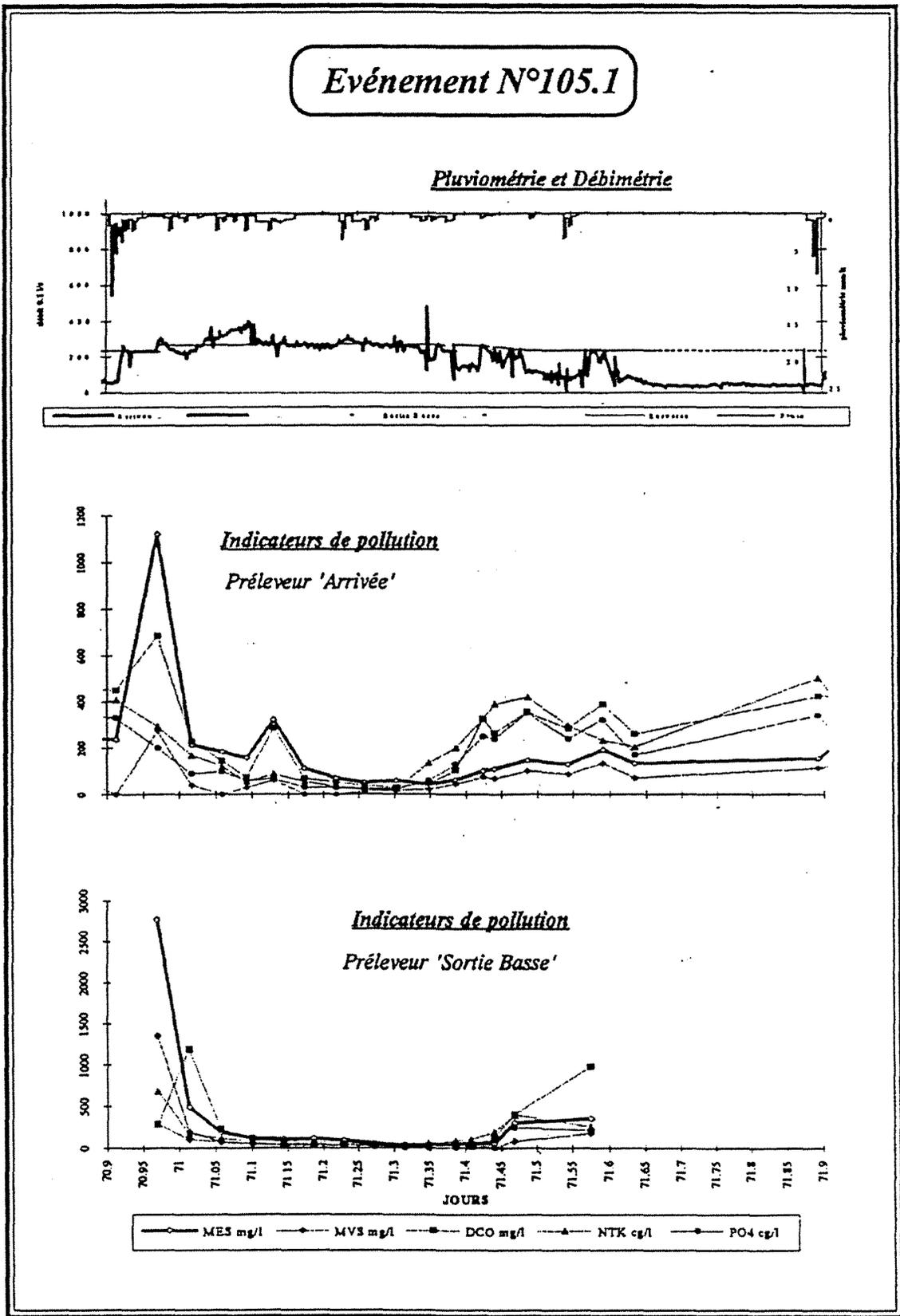


Figure II.8 : Exemple de graphiques de visualisation des enregistrements pour l'événement 105.1.

	N° évt	Date	H tot	I moy	I60	I20	I5	Durée évt	TS	MES max	MES max/h	MES tot	MES moy
1	22,1	03/05/87	7,5	0,8263	2,0420	5,4260	14,7862	0,3782	12,2571	297	12	383	52
2	22,2	03/05/87	12,0	1,2614	1,6952	1,7957	3,6010	0,3964	0,3738	227	60	183	107
3	23,2	04/05/87	17,5	1,6196	4,5809	5,3791	7,1781	0,4502	0,3019	658	27	80	503
4	28,1	15/05/87	2,0	0,4969	0,7300	1,5129	3,4134	0,1677	1,9411	3732	137	410	1520
5	33,1	29/05/87	3,6	0,4657	0,8379	2,2438	7,1238	0,3221	6,9106	1664	492	989	533
6	33,2	31/05/87	10,6	0,4790	3,3764	9,3313	20,7594	0,9220	1,6698	858	68	107	858
7	34,1	01/06/87	1,6	1,2508	1,3659	2,5961	5,3000	0,0533	3,3075	814	152	648	252
8	34,2	03/06/87	21,1	0,8312	3,6444	8,9871	12,3378	1,0677	0,3601	958	97	148	335
9	35,1	05/06/87	5,5	1,2468	2,3800	4,2280	6,2294	0,1838	1,9346	1452	235	294	521
10	36,1	11/06/87	3,0	11,0619	3,0000	9,0000	19,0257	0,0113	3,1540	774	77	500	500
11	36,2	12/06/87	6,0	4,3860	5,7936	14,4336	38,2056	0,0570	0,5586	1140	44	265	217
12	59,1	26/09/87	15,1	0,9703	3,2907	4,2136	5,1360	0,6484	1,8167	510	43	145	207
13	67,1	16/10/87	6,3	0,6548	0,8898	1,3870	2,2302	0,4009	1,5678	540	53	320	336
14	79,1	22/11/87	8,0	0,3191	1,5069	4,2410	5,9410	1,0447	1,0901	422	32	78	225
15	80,1	25/11/87	3,0	0,4854	1,1407	1,2932	2,5213	0,2575	2,1763	2700	185	473	1212
16	93,1	11/02/88	3,6	0,6547	1,3488	1,8212	2,6331	0,2291	9,7927	1080	76	146	660
17	95,1	12/03/88	2,0	0,6141	1,1283	1,3985	2,4278	0,1357	5,1869	1122	60	293	209
18	105,1	12/03/88	10,2	0,6485	2,2320	3,5926	7,6420	0,6554	3,6545	430	28	108	173
19	107,1	16/03/88	6,9	1,3403	2,8036	5,5675	8,0177	0,2145	1,8934	658	38	107	246
20	107,2	16/03/88	3,7	0,7124	2,9355	8,7153	20,8893	0,2164	0,3749	298	20	52	163
21	107,3	17/03/88	2,7	0,5257	1,3610	2,2538	3,0758	0,2140	0,3321	502	51	114	246
22	108,1	25/03/88	3,8	1,0261	2,7072	4,1863	10,7672	0,1543	0,7586	412	29	66	113
23	108,2	25/03/88	4,7	0,8214	2,3972	5,1077	13,2463	0,2384	0,3909	744	43	111	264
24	109,1	31/03/88	3,2	0,3544	0,8688	2,3289	7,6790	0,3762	2,6525	74	74	104	388
25	112,1	03/05/88	7,2	2,8125	6,2046	12,0623	23,4692	0,1067	5,4882	660	60	120	412
26	114,1	07/06/88	2,6	1,5678	1,6656	4,3184	7,6745	0,0691	1,1749	1455	164	213	800
27	114,2	12/06/88	4,3	2,1128	3,5394	8,1416	18,0784	0,0848	4,4215	3440	263	390	1413
28	121,1	29/06/88	3,6	5,0336	3,5026	10,9484	22,9328	0,0298	10,3305	131	131	202	41
29	121,2	30/06/88	2,4	2,5907	2,3017	3,6792	12,1399	0,0386	0,5598	307	62	85	201
30	121,3	01/07/88	9,7	4,6671	6,8367	14,4125	25,2000	0,0866	0,8213	402	63	118	242
31	122,1	14/07/88	5,6	0,7546	2,8382	3,7469	4,8014	0,3092	2,9997	2770	128	268	1541
32	123,1	24/07/88	2,2	0,7447	1,3507	1,8920	3,2271	0,1231	6,7879	1180	77	77	772
33	123,2	26/07/88	4,9	1,9426	3,8120	6,0997	14,7070	0,1051	2,2431	820	82	124	258
34	123,3	27/07/88	6,9	1,8418	2,6165	3,6651	8,1714	0,1561	0,4845	646	88	444	196
35	130,1	07/10/88	6,9	1,2699	5,0687	7,8793	14,7605	0,2264	0,6250	644	207	311	890
36	130,2	11/10/88	22,3	0,7458	2,0003	3,6890	5,3932	1,2458	3,1664	760	78	341	341
37	132,1	19/10/88	3,0	0,4706	2,0408	3,2489	4,0646	0,2656	6,7518				
38	133,1	20/10/88	6,6	1,2649	2,5549	3,4950	4,7538	0,2174	0,7102				
		MIN	1,6	0,3191	0,7300	1,2932	2,2302	0,0113	0,3019	227	12	52	107
		MAX	22,3	11,0619	6,8367	14,4336	38,2056	1,2458	12,2571	3732	492	989	1541
		MOY	6,6	1,6019	2,6418	5,2189	10,5142	0,3121	2,9216	1082	111	250	518
		Ecart type	5,1	1,9577	1,5068	3,5738	8,1681	0,3060	3,0338	857	98	188	414

Tableau II.2 : Caractéristiques des 38 événements de pollution retenus.

CHAPITRE III - TRAITEMENTS STATISTIQUES

CHAPITRE III - TRAITEMENTS STATISTIQUES

Un bref rappel des principales notions de statistique employées dans ce chapitre et le suivant figure en Annexe III.1

1. Analyse de la pluviométrie

1.1. Description des échantillons

1.11. Répartition des variables dans le temps - "saisonnalisation"

La Figure III.1 nous renseigne sur la répartition des événements pluvieux sur le site d'Entzheim. De cette représentation, il découle que le nombre d'événements (comme définis au Chapitre II § 3.21.) est doublé les mois d'été par rapport aux mois d'hiver. Cela s'explique par le climat continental du site d'étude. Les orages d'été sont nombreux, alors que les journées d'hiver, sans réelle pluie, sont fréquentes. Il n'est en effet pas rare d'observer en période hivernale des brouillards importants qui ne sont pas générateurs d'événements pluvieux selon la définition ici retenue.

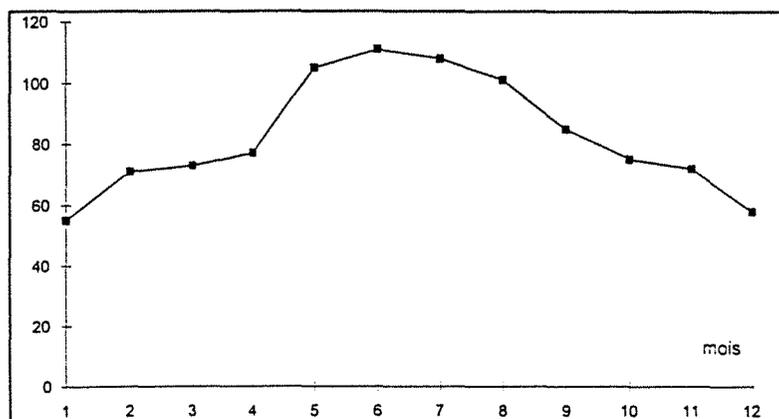


Figure III.1 : Variation annuelle du nombre d'événements sur 10,25 années d'observations.

Les Figures III.2 et III.3 indiquent la variation moyenne des variables de pluviométrie dans le temps mois par mois. L'enseignement que l'on peut tirer de ces deux graphiques est que les intensités moyennes des événements pluvieux sont très supérieures l'été par rapport à l'hiver, bien que la hauteur totale moyenne des événements ne montre pas de variation importante. La durée des événements est relativement constante, légèrement plus importante en hiver qu'en été. Ceci s'explique

par le fait que les épisodes d'été ont un caractère orageux, que n'ont pas les épisodes d'hiver, un peu plus long d'une manière générale par rapport à ceux d'été.

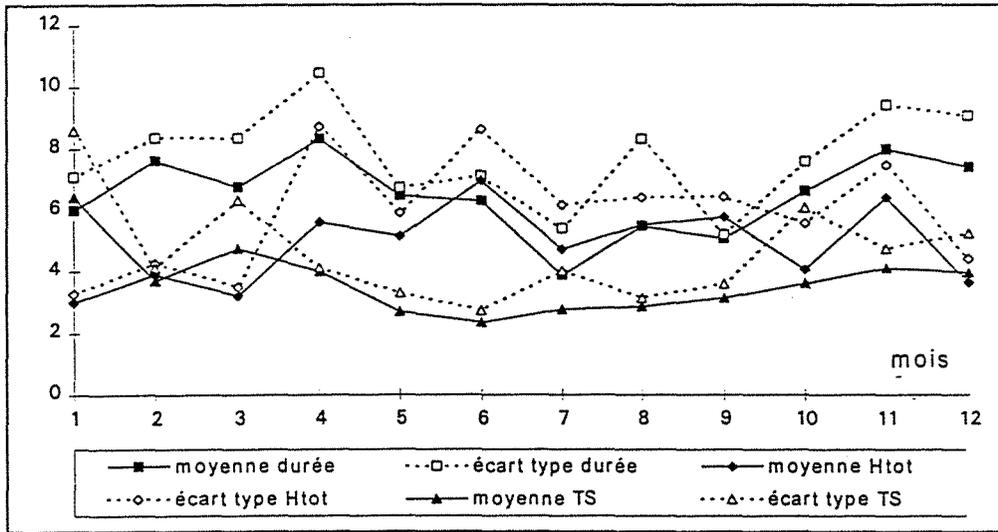


Figure III.2 : Variation annuelle des variables : Durée de l'événement, Hauteur totale, et Temps sec Précédent, représentées par les moyennes et les écarts-types.

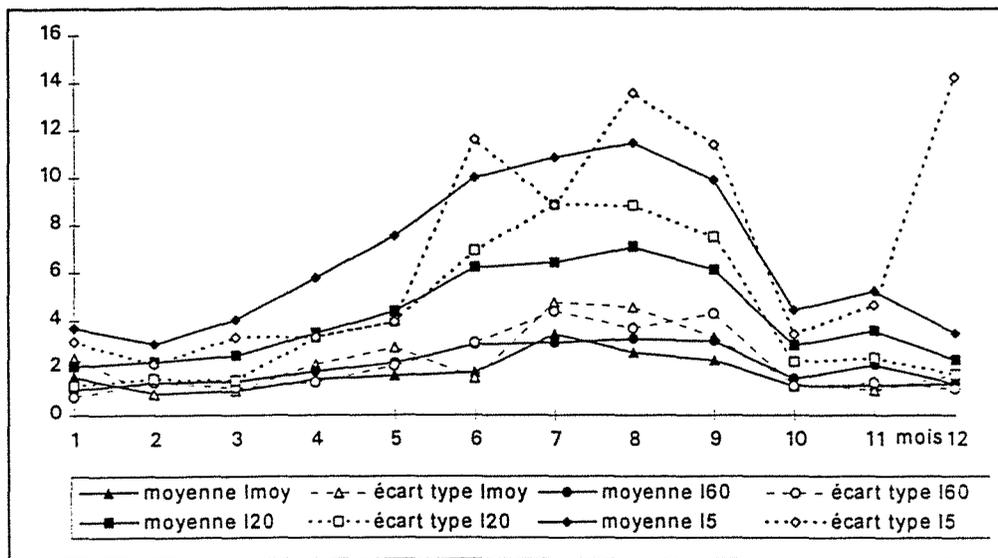


Figure III.3 : Variation annuelle des variables Intensité moyenne, intensité moyenne maximale sur 60, 20 et 5 min représentée par les moyennes et les écarts-types.

Une saisonnalisation doit donc être envisagée du point de vue hydrologique.

Une A.C.P. réalisée sur ces moyennes et écarts types (voir Annexe III.2), donne immédiatement la répartition mensuelle des deux saisons à adopter. La Figure III.4 représente la répartition des individus "mois" par rapport à l'axe unique retenu. Il en découle que l'été sera constitué des mois de mai, juin, juillet, août et septembre soit 5 mois et 510 événements sur 10,25 années. L'hiver sera constitué des 7 autres mois représentant 480 événements. Comme nous l'avons déjà

constaté sur la Figure III.1, la répartition en nombre d'événements est équilibrée entre les deux saisons.

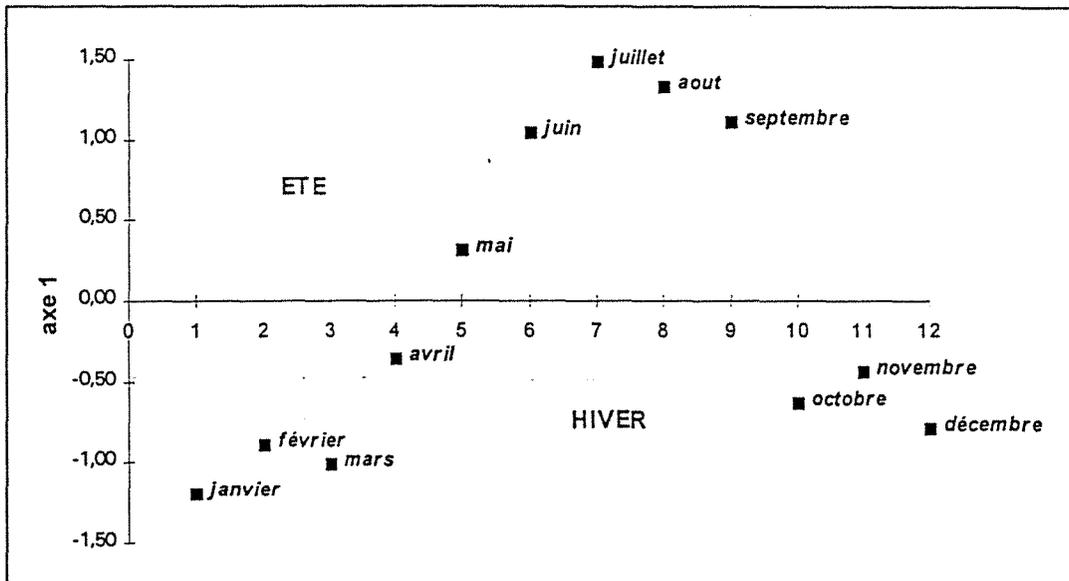


Figure III.4 : Résultat de l'A.C.P. sur les moyennes et écarts-types des variables de pluie, représentation des individus "mois".

1.12. Analyses numériques

Il est indispensable de résumer une série d'observations par des indicateurs typiques dont le plus connu est la moyenne arithmétique. Cependant résumer une série par un seul indicateur est insuffisant.

Les trois séries issues de la population de pluviométrie (totale : 990 individus, été : 510 individus et hiver : 480 individus) ont donc été analysées et décrites à l'aide des diverses caractéristiques rassemblées dans le Tableau III.1.

Ces caractéristiques sont :

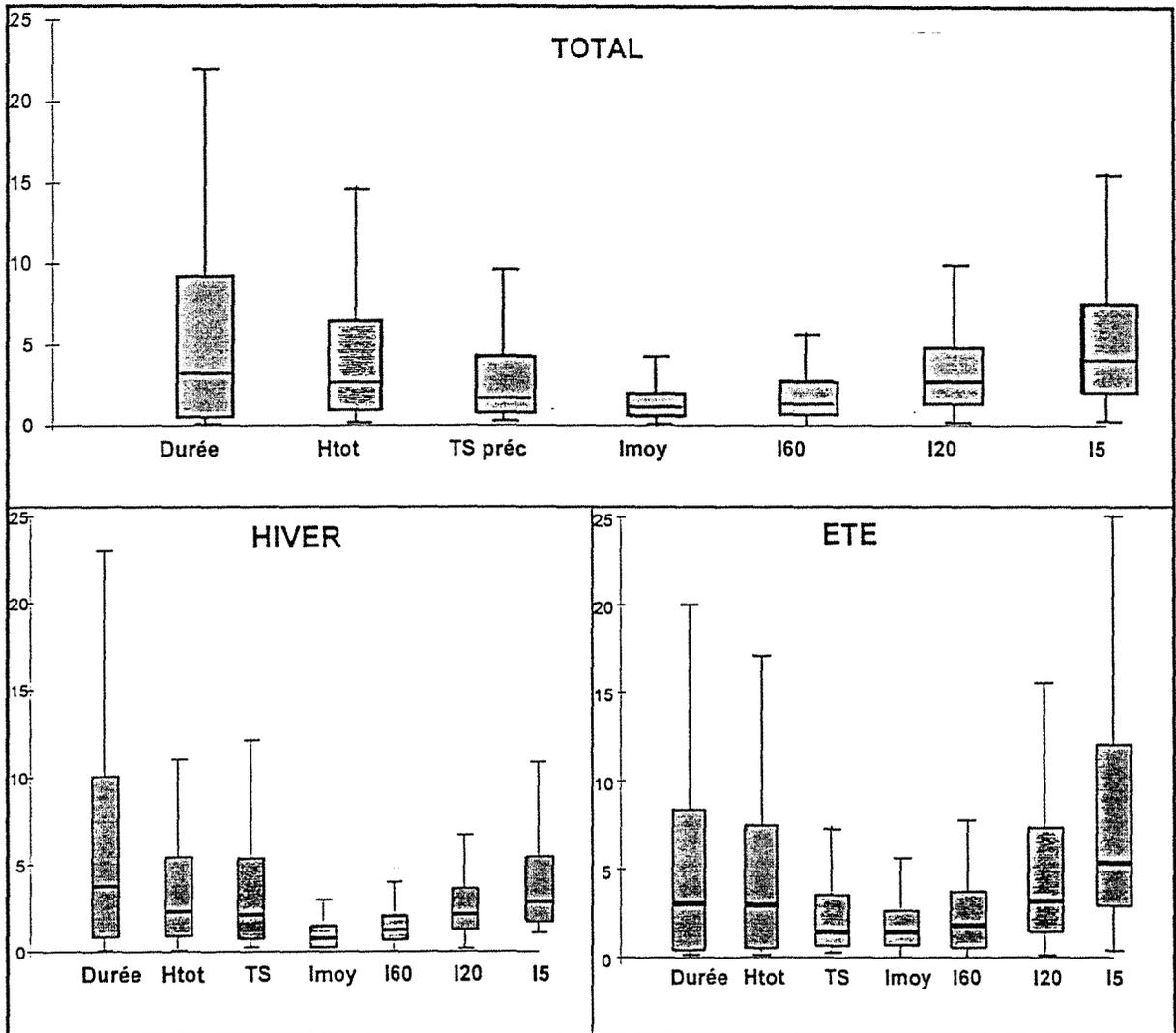
- les valeurs minimales et maximales des séries,
- la moyenne, la variance et l'écart-type,
- les quartiles Q1, Q2 et Q3 et les valeurs adjacentes correspondantes.

Les Figures III.5 représentent les diagrammes en boîte ou box & plot des principales caractéristiques de dispersion des variables étudiées dans le Tableau III.1.

Ces représentations graphiques facilitent la comparaison des séries les unes par rapport aux autres.

		Durée	Htot	TS préc	I moy	I60	I20	I5
Minimum:	Eté	0,0331	0,2	0,3403	0,078	0,017	0,100	0,300
	Total	0,0331	0,2	0,3333	0,022	0,017	0,100	0,300
	Hiver	0,0833	0,2	0,3333	0,022	0,017	0,150	1,000
Maximum:	Eté	40,1667	55,9	32,7292	40,800	24,500	52,059	112,800
	Total	53,6667	55,9	41,1493	40,800	24,500	52,059	112,800
	Hiver	53,6667	46,4	41,1493	15,600	6,945	18,800	32,400
Moyenne:	Eté	5,4638	5,6	2,7498	2,370	2,913	6,025	9,943
	Total	6,3520	5,0	3,5061	1,829	2,251	4,447	7,199
	Hiver	7,2938	4,3	4,3098	1,256	1,549	2,775	4,290
Variance:	Eté	45,2859	46,9	11,4991	13,175	12,661	55,429	154,294
	Total	60,9472	41,3	22,3472	8,276	7,678	33,484	94,854
	Hiver	75,9547	34,7	32,6649	2,459	1,449	4,834	15,537
Ecart type:	Eté	6,7295	6,8	3,3910	3,630	3,558	7,445	12,422
	Total	7,8069	6,4	4,7273	2,877	2,771	5,787	9,739
	Hiver	8,7152	5,9	5,7153	1,568	1,204	2,199	3,942
Q1:	Eté	0,5000	1,0	0,7292	0,691	0,700	1,650	3,000
	Total	0,6667	1	0,78819	0,530	0,725	1,457	2,100
	Hiver	0,9167	1,0	0,8750	0,430	0,750	1,380	1,800
Q2:	Eté	3,0833	3,0	1,4618	1,307	1,740	3,300	5,400
	Total	3,2500	2,6	1,6875	1,040	1,404	2,700	4,000
	Hiver	3,7500	2,3	2,1528	0,761	1,283	2,100	3,000
Q3:	Eté	8,3333	7,5	3,5278	2,640	3,650	7,200	12,000
	Total	9,2500	6,5	4,2813	2,011	2,750	4,800	7,600
	Hiver	10,0000	5,4	5,4097	1,500	2,067	3,600	5,400
Q1-1,5(Q3-Q1):	Eté	-11,2500	-8,8	-3,4687	-2,232	-3,725	-6,675	-10,500
	Total	-12,2083	-7,3	-4,4514	-1,692	-2,313	-3,557	-6,150
	Hiver	-12,7083	-5,6	-5,9271	-1,176	-1,225	-1,950	-3,600
val dir >	Eté	0,0331	0,2	0,3403	0,078	0,017	0,100	0,300
	Total	0,0331	0,2	0,3333	0,022	0,017	0,1	0,3
	Hiver	0,0833	0,2	0,3333	0,022	0,017	0,150	1,000
nb val<	Eté	0	0	0	0	0	0	0
	Total	0	0	0	0	0	0	0
	Hiver	0	0	0	0	0	0	0
Q3+1,5(Q3-Q1):	Eté	20,0833	17,3	7,7257	5,563	8,075	15,525	25,500
	Total	22,1250	14,8	9,5208	4,232	5,788	9,814	15,850
	Hiver	23,6250	12,0	12,2118	3,106	4,042	6,930	10,800
val dir <	Eté	20,0000	17,1	7,5083	5,544	7,900	15,525	25,200
	Total	22,0000	14,7	9,4965	4,222	5,753	9,800	15,600
	Hiver	23,0833	11,0	12,1840	3,086	3,971	6,720	10,800
nb val>	Eté	21	36	43	36	40	46	50
	Total	57	72	86	91	76	98	91
	Hiver	34	34	40	38	23	23	31

Tableau III.1 : Présentation des principales caractéristiques des variables de pluies et de temps sec.



Figures III.5 : Représentation graphique en box & plot des variations des variables de pluie et de temps sec.

➤ Comparaison des séries

Des Figures III.5, il ressort que la durée présente une forte dispersion quelle que soit la saison observée. Par contre, la hauteur totale et les intensités moyennes maximales sur 5 et 20 minutes montrent une assez forte dispersion, cette fois plus prononcée en été qu'en hiver. Ceci est dû à la différence de la nature des pluies d'hiver et d'été. Le temps sec, quant à lui, varie plus en hiver qu'en été. En effet, les précipitations orageuses ont une fréquence plus importante en été, ce qui occasionne des temps secs d'été plus courts qu'en hiver où elles sont plus rares.

1.13. Liens entre les variables - Résultats de l'A.C.P.

Afin de dégager au mieux les divers liens qui peuvent exister entre les variables de pluviométrie, elles ont toutes été introduites de la même façon dans l'A.C.P., à l'exception de l'intensité moyenne, qui a été introduite en variable supplémentaire (combinaison de Htot et Durée).

Intuitivement, il semble évident qu'il existe un certain nombre de corrélations entre les variables utilisées. En effet, il est logique que l'intensité moyenne maximale sur 5 minutes soit fortement corrélée avec l'intensité moyenne maximale sur 20 minutes. Il en est de même pour un certain nombre de variables. Le Tableau III.2 regroupant les coefficients de corrélation (deux à deux) nous renseigne sur la force de ces liens. Au dessus de la diagonale de ce tableau sont mentionnés les coefficients de corrélation des événements d'été, en dessous figurent ceux d'hiver.

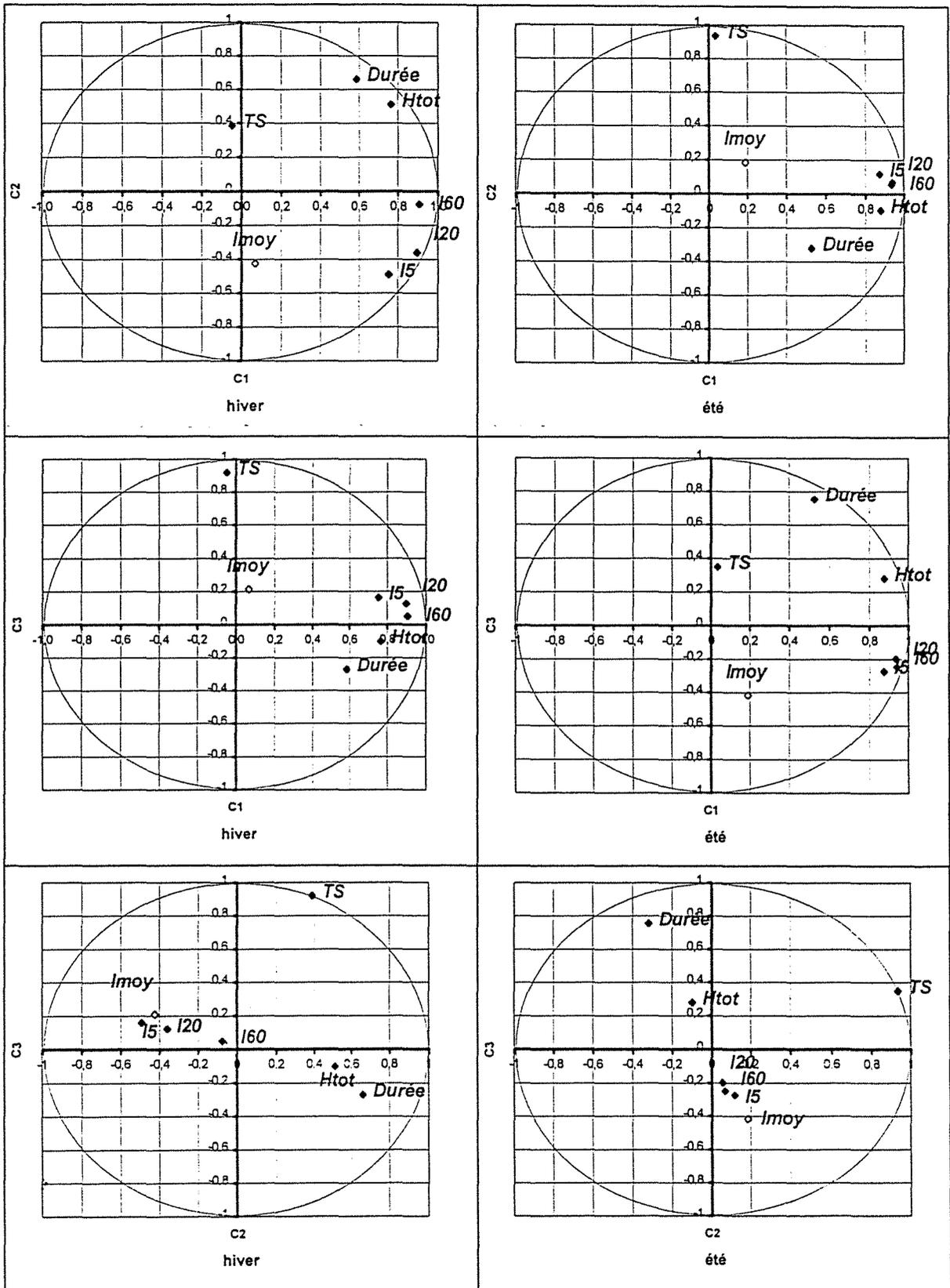
		E T E						
		Durée évt	Htot	TS préc	Imoy	Imoymax sur 60 min	Imoymax sur 20 min	Imoymax sur 5 min
H I V E R	Durée évt	1,000	0,622	-0,016	-0,300	0,310	0,308	0,264
	Htot	0,697	1,000	0,033	0,084	0,770	0,709	0,617
	TS préc	-0,003	0,054	1,000	0,031	0,018	0,013	0,042
	Imoy	-0,354	-0,085	0,019	1,000	0,257	0,266	0,317
	Imoymax sur 60 min	0,397	0,640	-0,032	0,036	1,000	0,928	0,793
	Imoymax sur 20 min	0,261	0,472	-0,065	0,209	0,843	1,000	0,875
	Imoymax sur 5 min	0,160	0,296	-0,069	0,353	0,592	0,829	1,000

Tableau III.2 : Coefficients de corrélation (deux à deux) entre les variables de pluviométrie.

Comme cela était prévisible les intensités moyennes maximales sont fortement corrélées entre elles. Il existe aussi une assez bonne corrélation entre ces variables et la hauteur totale, surtout en été. En effet, plus un événement est long, plus la hauteur d'eau tombée est importante, mais plus l'intensité moyenne sera faible, c'est pourquoi on observe une variation opposée des variables Durée évt et Imoy. La durée de l'événement et la hauteur totale sont également bien corrélées.

Par contre, le temps sec n'est absolument pas corrélé avec les autres variables quelle que soit la saison. Ce résultat, escompté, n'a rien de surprenant compte tenu de la façon dont les variables ont été définies en considérant des événements indépendants.

Les résultats des A.C.P. (Figures III.6) réalisées sur les échantillons saisonnalisés confirment ces observations.



Figures III.6 : Représentation des cercles de corrélation sur les plans C1-C2, C1-C3 et C2-C3 des échantillons de pluviométrie d'hiver (à gauche) et d'été (à droite).

On a choisi pour ces A.C.P. de se ramener à trois composantes principales au maximum. Les résultats indiquent des variances expliquées respectivement pour l'hiver, puis pour l'été de :

- ⇒ 52% et 60% pour la première composante,
- ⇒ 21% et 17% pour la deuxième composante,
- ⇒ 16% dans les deux cas pour la troisième composante.

Soit une variance totale expliquée de 92% et 89%. Les trois axes expliquent donc plus de 9/10^{ème} de l'information, ce qui est tout à fait convenable.

La première constatation que l'on fait lorsque l'on examine ces graphiques est que la répartition des variables est semblable quelle que soit la saison, à condition toutefois d'inverser la 2^{ème} et la 3^{ème} composante des résultats obtenus pour l'été face à l'hiver. Cette permutation s'explique par le fait que les variances expliquées respectivement par ces deux axes ne diffèrent que d'un pour-cent.

Du cercle de corrélation des premières et deuxièmes composantes principales (C1-C2) de l'hiver, il ressort que toutes les variables sont bien représentées à l'exception du temps sec et de l'moy. I60, I20 et I5 forment un premier groupe de variables qui varient de façon identique, principalement suivant la première composante. Durée et Htot sont proches et également bien représentés par les deux premières composantes.

L'intensité moyenne et la durée de l'événement représentées essentiellement par la seconde composante forment un second groupe de variables qui varient en sens opposé. En effet, en règle générale, l'intensité moyenne d'un événement sera d'autant plus petite que sa durée sera longue. On observe de nouveau le contraste des événements pluvieux orageux et des pluies plus longues, d'intensité peu exceptionnelle.

Naturellement les variables sont globalement moins bien représentées dans le second plan (C1-C3), constitué de la première et la troisième composante. Toutefois, le temps sec varie seulement avec la troisième axe. On retrouve le positionnement du premier groupe principalement sur la première composante, le deuxième groupe est, quant à lui, mal représenté par ce plan.

Le plan C2-C3 montre une indépendance entre le temps sec et le groupe composé de l'intensité moyenne et de la durée de l'événement.

On peut donc dire que les trois groupes, ainsi identifiés, varient de façon indépendante les uns par rapport aux autres. On les considérera statistiquement indépendants.

Aucun individu n'a été rentré en "individu supplémentaire". L'étude de la répartition de ces individus, dont les graphiques de représentation figurent en Annexes III.3.1 et III.3.2, indique une bonne homogénéité. En effet, sur les deux échantillons d'environ 500 individus, seule une dizaine est systématiquement plutôt mal représentée.

1.2. Ajustement de lois

Qu'il s'agisse des pluies ou des temps secs, de nombreuses lois couramment utilisées en hydrologie ont été testées (Gauss, Galton, Gumbel, Fuller, Weibull...). L'étude des 990 événements montre un fort poids des valeurs faibles, mais il est toujours possible d'ajuster dans des conditions acceptables des lois de Weibull, été comme hiver. L'expression générale de la loi de Weibull est la suivante :

$$\text{Weibull : } G(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x-x_0}{g}\right)^p\right)$$

Les ajustements ont été réalisés comme défini à l'Annexe III.1 et les résultats graphiques sont joints en Annexe III.4.

Les paramètres résultant des ajustements des équations sont résumés dans le Tableau III.3 suivant:

	ETE				HIVER			
	p	x ₀	g	M ₁ (M=14)	p	x ₀	g	M ₁ (M=13)
TS	0,78	0,3	2,2	17	0,73	0,3	3,3	20
Durée évt	0,8	0	4,9	28	0,82	0	7,3	14
Htot	0,8	0,1	4,9	39	0,78	0,1	3,4	45
Imoy	0,8	0,04	1,70	17	0,68	0,02	0,73	16
I60	0,78	0	2,4	38	1,25	0	1,65	16
I20	0,78	0	5,1	22	0,85	1	1,6	18
I5	0,73	0,2	7,9	21	0,94	0,9	3,4	27

Tableau III.3 : Résumé des paramètres de calage de lois et des tests d'ajustement sur les variables de pluviométrie

L'étude de l'ajustement des paramètres de la loi de Weibull, en été comme en hiver, indique une similitude de comportement des variables. On notera que le paramètre p conserve une valeur voisine de 0,8.

2. Analyse de la pollution

2.1. Analyses numériques et comparaison

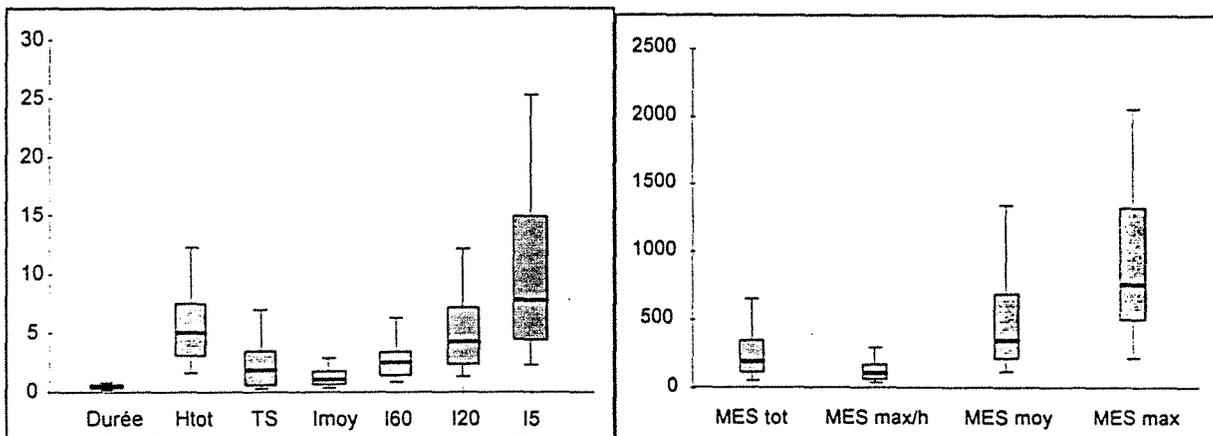
2.1.1. Description générale de l'échantillon de pollution

A l'image de l'analyse présentée pour les échantillons de pluviométrie, le Tableau III.4 et les Figures III.7 résument les caractéristiques de l'échantillon de pollution que nous avons pu extraire des

enregistrements effectués sur le site. Il s'agit d'un échantillon de 38 événements. Bien que l'on dispose de 22 événements enregistrés en période estivale et de 16 événements d'hiver, il n'a pas été jugé raisonnable de saisonnaliser l'analyse compte tenu du petit nombre total d'individus.

	Durée	H tot	TS	I moy	I60	I20	I5	MES tot	MES max/h	MES moy	MES max
Min	0,0113	1,6	0,3019	0,319	0,730	1,293	2,230	52	12	107	227
Max	1,2458	22,3	12,2571	11,061	6,836	14,433	38,205	989	492	1541	3732
Moy	0,3121	6,6	2,9216	1,601	2,641	5,218	10,514	250	111	514	1082
var	0,0936	26,0	9,2036	3,832	2,270	12,772	66,717	35409	9670	169218	734136
ET	0,3060	5,1	3,0338	1,957	1,506	3,573	8,168	188	98	411	857
Q1	0,1059	3,0	0,5924	0,631	1,363	2,291	4,409	109,5	43,5	213	506
Q2	0,2164	4,9	1,8934	0,831	2,380	4,186	7,642	183	74	336	760
Q3	0,3772	7,4	3,4810	1,593	3,333	6,989	14,733	337,5	144,5	673	1316
Q1- 1,5(Q3-Q1)	-0,3011	-3,525	-3,7405	-0,812	-1,591	-4,755	-11,078	-232,5	-108	-477	-709
Val dir >	0,0113	1,6	0,3019	0,319	0,730	1,293	2,230	52	12	107	227
nb val <	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Q3+ 1,5(Q3-Q1)	0,7842	13,875	7,8139	3,037	6,288	14,037	30,221	679,5	296	1363	2531
Val dir <	0,6554	12	6,9106	2,812	6,204	12,062	25,200	648	263	1331	2060
nb val >	4	4	3	4	1	2	1	1	2	3	4

Tableau III.4 : Présentation des principales caractéristiques des variables de pluies, de temps sec et de pollution.



Figures III.7 : Représentation graphique en box & plot des variations des variables de pluie (à gauche) et des paramètres de pollution (à droite).

2.12. Analyse de la pluviométrie observée

Une constatation immédiate s'impose à l'examen du Tableau III.4 et des Figures III.7 : il n'y a pas eu observation d'un événement dont la durée soit importante (supérieure à 1 à 2 jours suivant la définition retenue). C'est la seule variable qui présente des variations anormalement faibles.

Les périodes de temps secs observés sont relativement faibles et correspondraient à une prédominance d'événements à caractère estival. Le fait que l'on observe des intensités moyennes maximales sur 5 minutes assez élevées, tend à confirmer cette hypothèse. Le reste des paramètres présente des variations moyennes semblables à celles de l'échantillon de pluviométrie totale.

Du point de vue hydrologique, les paramètres observés sont donc cohérents avec ceux observés pour les 10,25 années de pluie, à l'exception, peut être, de la durée des événements qui ne présente pas de valeur forte. Les périodes de retour maximales des paramètres de pluviométrie (Tableau III.5), observées lors des 2 années de mesures de pollution, calculés à partir des lois établies au paragraphe 1.2, nous renseignent sur la rareté de ces événements de pollution que nous avons observé.

	Durée évt	H tot	TS	I moy	I60	I20	I5
Maximum	10 jours	1,6 an	0,9 an	1,7 an	6,7 an	1,0 an	4,2 an

Tableau III.5 : Périodes de retour maximales observées pour les paramètres d'hydrologie sur l'échantillon de pollution.

Ces résultats attestent que nous n'avons pas mesuré d'événement présentant des caractéristiques exceptionnelles. Notons, cependant, que ces conclusions ne doivent pas préjuger de la rareté en terme de période de retour des paramètres de pollution. En effet, une pluie courante peut engendrer une pollution relativement importante.

2.13. Analyse de la pollution observée

Les résultats, pour les paramètres de pollution, issus de la campagne de mesures sur Entzheim, ont été comparés à ceux issus d'une recherche bibliographique (Chebbo *et al.*, 1995 ; Saget, 1995 ; Servat, 1984)

➤ Masse totale de MES produite par événement (MES tot)

Les éléments de comparaison sont difficiles à trouver car la plupart des informations disponibles sont rarement ramenées à l'hectare actif et sont souvent données sous forme de bilans annuels. Les seules valeurs disponibles (Chebbo *et al.*, 1995) indiquent, pour les masses les plus importantes issues d'un événement pluvieux, des variations de 24-190 kg/ha-act en unitaire, de 80-550 kg/ha-act en séparatif et de 80-180 kg/ha-act en séparatif pollué.

Si l'on considère la valeur maximale enregistrée sur Entzheim (989 kg = 63 kg/ha-act), on constate qu'elle est comprise dans les fourchettes des observations recueillies sur d'autres sites. Toutefois cet événement ne représente certainement pas le seuil maximum que l'on doit pouvoir atteindre sur ce bassin. Selon la fourchette évoquée pour les sites équipés en unitaire, on peut évaluer ce seuil à plus de 3000 kg. En effet, l'analyse des concentrations tend à montrer qu'Entzheim suit, en moyenne, un comportement semblable à celui des autres sites, et plus précisément de ceux équipés en unitaire. La particularité liée à la reprise de dépôts se traduit probablement par des valeurs maximales observées importantes.

Les données observées, lors de la campagne de mesure expérimentale de 1982, sur les sites de Maurepas, Les Ulis, Aix Zup et Aix Nord (Hémain, 1985), donnent pour des événements importants les masses totales par hectare actif résumées dans le Tableau III.6.

site	Pollution	Pluviométrie correspondante		
	MES	H	I4	TS
Maurepas	373	47,4	52	8,2
Les Ulis	158	11,0	54	5,9
Aix Zup	163	37,0	130	5,8
Aix Nord	210	30,0	89	5,8

MES : Charges maximales (kg/ha-act)

H : Hauteur d'eau (mm)

I4 : Intensité moyenne maximale sur 4 minutes (mm/h)

TS : durée de temps sec (jours)

Tableau III.6 : Charges maximales observées et caractéristiques des pluies correspondantes.

Ces événements seraient des événements de période de retour pour Entzheim comprises entre :

- ⇒ 1 mois et 9 ans pour la hauteur totale,
- ⇒ 1an et 45 ans pour l'intensité moyenne maximale,
- ⇒ 2 mois et 4 mois pour le temps sec.

Bien qu'il s'agisse de bassins versants différents, ces observations nous incitent à penser que sur Entzheim le seuil de pollution maximum pourrait atteindre une valeur voisine de 6000 kg ($373 \cdot 40 \cdot 0,39 = 5819$ kg).

➤ Concentration moyenne en MES par événement (MES moy)

Les concentrations sont les paramètres les plus faciles à comparer d'un site à l'autre. Saget (1995), dans son étude bibliographique, annonce qu'en zone résidentielle les concentrations moyennes par événement sont comprises entre 112 et 1104 mg/l. Dans la base de données

"QASTOR" qu'elle a constituée, elle fournit quelques éléments de comparaison plus détaillés sur des bassins versants équipés en assainissement unitaire. Le Tableau III.7 résume ces renseignements.

Site	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart type
La Briche DD11	174	497	953	225
La Briche D11	171	347	692	144
La Briche PHI	222	427	757	152
La Briche Enghien	60	267	741	194
La Briche PLB	147	417	904	169
Mantes	99	570	1760	362

Entzheim	107	514	1541	411
----------	-----	-----	------	-----

Tableau III.7 : Comparaison du domaine de variation des concentrations moyennes (mg/l) d'Entzheim avec des sites analogues.

Les concentrations moyennes et l'écart-type observés à Entzheim sont donc comparables aux diverses valeurs mesurées sur d'autres sites, plus particulièrement à celles du site de Mantas.

➤ **Concentration maximale en MES par événement (MES max)**

Site	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart type
6 sites en unitaire	692	968	1760	366
4 sites en séparatif et mixte	784	1540	2475	744
7 sites en séparatif	645	1608	3784	975

Entzheim	227	1082	3762	857
----------	-----	------	------	-----

Tableau III.8 : Comparaison du domaine de variation des concentrations maximales (mg/l) d'Entzheim avec d'autres mesures.

Du point de vue des concentrations moyennes, le bassin d'Entzheim se comporte comme les autres sites équipés en réseau unitaire. Les concentrations maximales et l'écart type sont élevés, cela est probablement lié à la remise en suspension occasionnelle des dépôts stockés dans le réseau.

Il n'existe à ce jour aucun élément de comparaison des charges horaires ou des charges par temps de concentration entre bassins.

2.2. Liens entre les variables - Résultats de l'A.C.P.

2.2.1. Vérification des liens entre les variables de pluviométrie

	Durée	Htot	TS préc	Imoy	Imoymax sur 60 min	Imoymax sur 20 min	Imoymax sur 5 min
Durée	1,000						
Htot	0,774	1,000					
TS préc	-0,131	-0,233	1,000				
Imoy	-0,104	-0,104	0,033	1,000			
Imoymax sur 60 min	-0,106	0,325	-0,190	0,450	1,000		
Imoymax sur 20 min	-0,093	0,199	-0,060	0,579	0,885	1,000	
Imoymax sur 5 min	-0,206	0,021	-0,017	0,569	0,772	0,939	1,000

Tableau III.9 : Coefficients de corrélation (deux à deux) entre les variables de pluviométrie sur l'échantillon de pollution.

Comme pour l'analyse de l'échantillon de pluviométrie, on retrouve des liens importants, du même ordre de grandeur et de même sens, entre la hauteur totale des précipitations et la durée de celles-ci et entre la durée et la hauteur d'eau tombée (Tableau III.9 et Annexe III.5). Les intensités moyennes maximales sont mieux corrélées entre-elles, par contre elles présentent des variations inverses à la durée contrairement à l'échantillon de pluviométrie.

Cela est probablement lié au fait que l'on n'a observé que des événements relativement courants de très faible durée.

Le temps sec ne présente pas plus de corrélation avec les autres variables que dans l'échantillon de pluie.

2.2.2. Etude des liens entre les variables de pluviométrie et les variables de pollution

Le Tableau III.10 rassemble les coefficients de corrélation obtenus entre les variables de pluviométrie et les variables de pollution.

Les variables représentatives des matières en suspension caractérisant la pollution sont diversement corrélées. La masse totale de MES produite par un événement varie essentiellement avec la durée de l'événement et avec la hauteur totale de pluie tombée. La charge horaire varie principalement comme l'intensité moyenne maximale sur 5 minutes. On notera, enfin que les concentrations moyenne et maximale varient en fonction du temps sec.

	H tot	I moy	I60	I20	I5	Durée evt	TS
MES tot	0,396	0,012	0,078	0,223	0,219	0,530	0,232
MES max/h	-0,003	0,343	0,278	0,452	0,522	0,041	0,247
MES max	-0,269	0,131	-0,189	-0,021	0,071	-0,144	0,725
MES moy	-0,447	0,354	-0,183	-0,010	0,077	-0,353	0,650

Tableau III.10 : Corrélation entre les variables de pollution et les variables de pluviométrie de l'échantillon de pollution

Les résultats de l'A.C.P. réalisée sur l'échantillon de pollution, en introduisant les variables représentatives des MES en variables supplémentaires, sont résumés sur les Figures III.8 (voir Annexe III.5 pour les résultats numériques).

Les variances expliquées pour les trois composantes sont du même ordre que pour l'A.C.P. de pluviométrie :

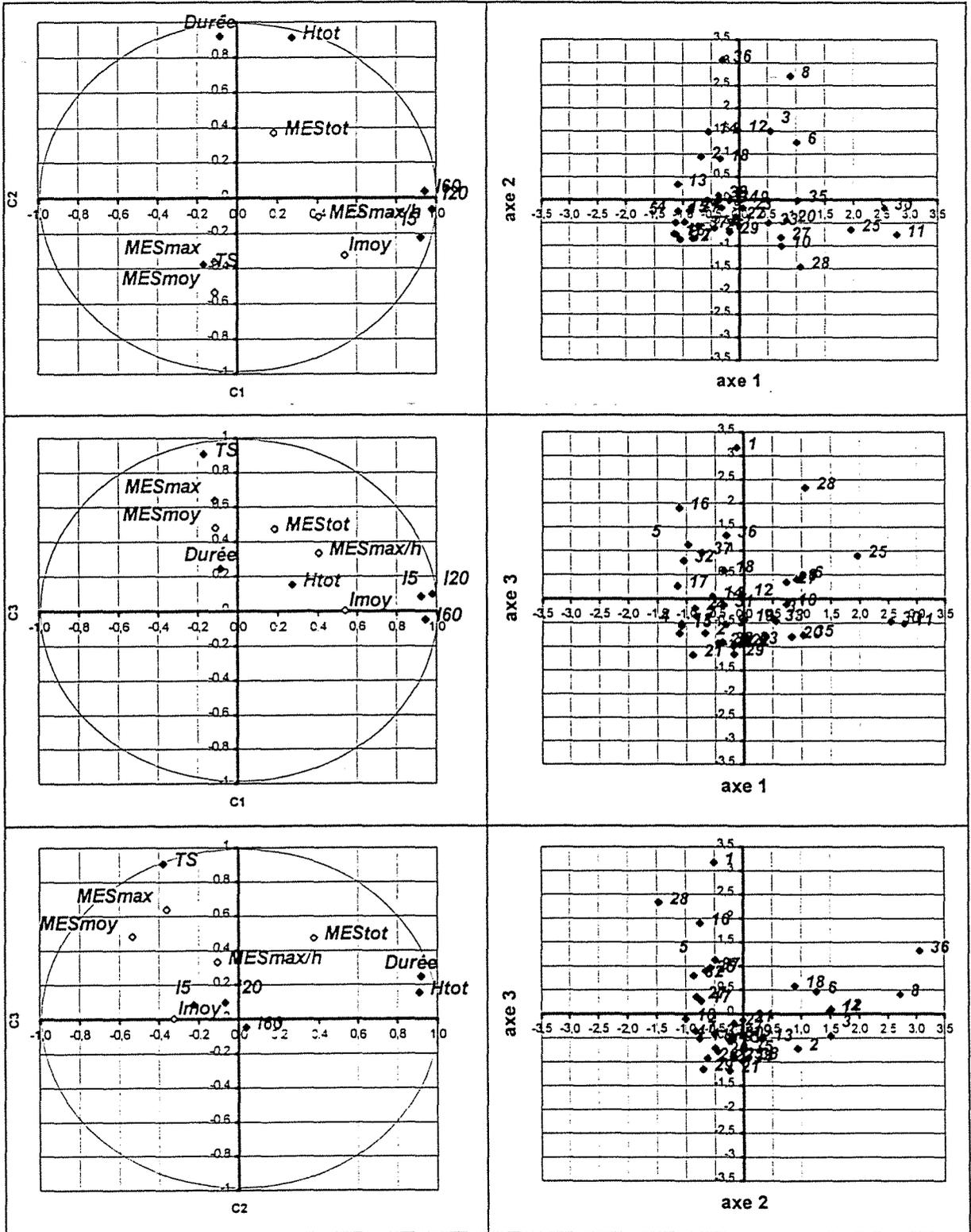
- ⇒ 47% pour la première composante,
- ⇒ 31% pour la deuxième composante,
- ⇒ 15% pour la troisième composante.

➤ Etude des cercles de corrélation

Du point de vue des variables de pluviométrie, on observe que I5, I20 et I60 sont portées par la première composante comme dans l'échantillon de pluviométrie. De même, TS est porté par la troisième composante. Par contre, on observe que la durée et Htot qui varient de la même façon sont portées à présent par C2 au lieu de C1. Quant à Imoy, on la trouve principalement sur C1 au lieu de C2.

Les variables de pollution se positionnent relativement mal, elles sont plutôt proches de la composante C2. Les autres informations que l'on peut tirer sont :

- ⇒ les MES tot semblent varier partiellement comme la Durée et Htot,
- ⇒ les MES max et MES moy sont voisines de TS,
- ⇒ les MES max/h seraient influencées par les intensités (I5, I20, I60 et Imoy).



Figures III.8 : Résultats graphiques de l'A.C.P. sur l'échantillon de pollution. Cercles de corrélation des composantes principales (à gauche) et plan de représentation des axes principaux (à droite).

➤ Etude des individus

Quel que soit le plan étudié, on constate qu'un certain nombre d'individus sont "éparpillés" sur les axes. Les principaux sont les individus 1, 8, 11, 28, 30 et 36. Comment peut-on savoir s'ils présentent un défaut ou s'ils sont simplement à l'écart en raison de leurs caractères exceptionnels (fort TS, forte Htot...)? Le simple examen des variables relatives à ces points ne permet pas de conclure, une étude complémentaire devra être menée.

3. Les régressions linéaires

3.1. Choix des variables

L'objectif est d'expliquer les variables de pollution par celles décrivant l'événement pluvieux.

Les premiers calculs ont donc été réalisés sur les variables telles quelles. Puis, dans l'intention d'améliorer les résultats, des changements de variables ont été opérés sur les variables de pluviométrie, et les ajustements suivants ont été réalisés :

$$Y' = a_i \ln X_i + b$$

$$Y' = \frac{a_i}{X_i} + b$$

$$Y' = a_i \exp(X_i) + b$$

Enfin, des changements de variables multiples ont été testés, en considérant pour chacune d'entre-elles, le "changement" de variable qui présente le meilleur coefficient de corrélation partiel, et en réalisant le calcul de régression sur un tel ensemble. L'objectif étant de déceler le meilleur ensemble de variables de pluviométrie qui expliquerait au mieux la pollution. Les résultats présentés dans le paragraphe qui suit, sont issus de calculs de régressions, réalisées sur l'échantillon de pollution composé de 38 événements. Ces calages n'ont pas fait l'objet d'une quelconque validation sur d'autres échantillons.

3.2. Les résultats sur l'échantillon d'Entzheim

➤ Régressions linéaires multiples sans changement de variable

variable	régression	r	R2
MES tot	= 8,2 l5 + 396,9 Durée + 20,0 TS - 18,8	0,70	0,49
MES max/h	= 6,3 l5 + 45,3	0,52	0,27
MES max	= 204,7 TS + 483,8	0,72	0,53
MES moy	= -22,8 Htot + 64,6 lmoy + 78,4 TS + 337,3	0,78	0,61

Tableau III.11 : Résultats des régressions linéaires multiples sans changement de variable.

➤ Régressions linéaires multiples avec changement de variable

⇒ les X_i ont été transformés en $\ln(X_i)$

variable	régression	r	R2
MES tot	= 110,0 $\ln(I5)$ + 91,1 $\ln(\text{Durée})$ + 51,3 $\ln(\text{TS})$ + 140,6	0,56	0,31
MES max/h	= 64,9 $\ln(I5)$ + 26,6 $\ln(\text{TS})$ - 37,7	0,55	0,30
MES max	= 492,2 $\ln(\text{TS})$ + 815,9	0,63	0,39
MES moy	= - 220,3 $\ln(\text{Htot})$ + 147,0 $\ln(\text{Imoy})$ + 203,3 $\ln(\text{TS})$ + 760,6	0,76	0,58

Tableau III.12 : Résultats des régressions linéaires multiples avec changements de variables en $\ln(X_i)$.

⇒ les X_i ont été transformés en $1/X_i$

variable	régression	r	R2
MES tot	= -462,9 / Htot + 357,7	0,34	0,12
MES max/h	= -100,9 / $I60$ + 163,7	0,32	0,10
MES max	= -404,9 / TS + 1480,9	0,46	0,21
MES moy	= 824,2 / Htot + 9,7 / Durée - 152,8 / TS + 388,6	0,69	0,48

Tableau III.13 : Résultats des régressions linéaires multiples avec changements de variables en $1/X_i$.

⇒ les X_i ont été transformés en e^{X_i}

variable	régression	r	R2
MES tot	= 179,2 $e^{\text{Durée}}$ - 8,4	0,54	0,29
MES max/h	= 5,4 $10^{-15} e^{I5}$ - 105,8	0,35	0,12
MES max	= 5,5 $10^{-3} e^{\text{TS}}$ + 1044,2	0,21	0,04
MES moy	= 1,3 $10^{-2} e^{\text{Imoy}}$ + 496,2	0,33	0,11

Tableau III.14 : Résultats des régression linéaires multiples avec changements de variables en e^{X_i} .

➤ Régressions linéaires multiples avec changements de variables multiples

variable	régression	r	R2
MES tot	= 74,5 $\ln(I5)$ + 201,3 $e^{\text{Durée}}$ + 20,3 TS - 254,4	0,69	0,48
MES max/h	= 6,3 $I5$ + 45,3	0,52	0,27
MES max	= 204,7 TS + 483,8	0,72	0,53
MES moy	= -216,9 $\ln(\text{Htot})$ + 65,4 Imoy + 75,9 TS + 551,3	0,81	0,65

Tableau III.15 : Résultats des régressions linéaires multiples avec changement de variables multiples.

Les meilleurs résultats obtenus pour les coefficients de corrélation des modèles linéaires de pollution varient entre 0,55 et 0,81. Globalement, les variables mises en jeu lors de ces régressions sont celles qui ont déjà été pressenties lors des analyses précédentes.

Des diverses régressions testées, on peut dire que les changements de variables n'apportent pas d'amélioration par rapport aux modèles linéaires obtenus sans changement de variable. Sauf pour MES max/h en $\text{Ln}(X_i)$ où on observe une amélioration de 3 points du coefficient de corrélation, mais celui-ci reste encore fort modeste puisqu'il ne dépasse pas 0,55.

Le bénéfice des changements de variables multiples n'est pas énorme non plus puisqu'il n'améliore que d'un peu plus de 2 points le coefficient de corrélation du modèle pour les MES moy.

3.3. Comparaisons avec d'autres sites

Comme le rappelle Saget (1995), une revue des études statistiques aux Etats-Unis et en Europe montre qu'il est difficile de dresser un bilan. La comparaison est d'autant plus déraisonnable que l'on arrive à comparer des résultats sur des sites différents, obtenus à l'aide de méthodes de calcul différentes et/ou en utilisant des paramètres différents.

Notons toutefois que Servat (1984), qui a travaillé sur les données de la campagne expérimentale française de 1982 sur les bassins d'Aix ZUP, d'Aix NORD, des Ulis et de Maurepas, a trouvé des résultats du même type sur l'étude de la concentration moyenne de MES, bien qu'utilisant un certain nombre de variables différentes.

4. Conclusion

L'échantillon de pollution recueilli à Entzheim est globalement homogène tant du point de vue de la pluviométrie que de la pollution. L'étude statistique préliminaire montre toutefois que cet échantillon ne contient pas d'événement exceptionnel au regard des paramètres de pluviométrie.

Les études statistiques constituent toujours une étape intéressante pour déterminer les variables explicatives de certains phénomènes. Le choix des variables est grand, mais cette diversité de sélection ne facilite pas les comparaisons entre les divers sites étudiés.

Cette étape est nécessaire pour la suite de l'étude, car elle a permis d'identifier les paramètres les plus importants (Tableau III.16).

variable	Coef. de cor.	A.C.P.	Régressions
MES tot	Durée ~ Htot	Durée ~ Htot ~ TS	Durée ~ I5 ~ TS
MES max/h	I5	I5	I5
MES max	TS	TS	TS
MES moy	TS ~ Htot	TS	TS ~ Htot ~ Imoy

Tableau III.16 : Récapitulatif des variations des paramètres de pollution en fonction des variables de pluviométrie.

C'est donc principalement aux variables de pluviométrie : Durée, Htot, TS et I5 que l'on s'intéressera dans l'étude de la modélisation globale (Chapitre V), et on laissera de côté : Imoy, I60 et I20.

La pertinence et la tendance des modèles globaux seront comparées aux résultats des régressions linéaires multiples sans changement de variable. En effet, le gain obtenu au moyen des changements de variables n'est pas assez significatif pour être retenu.

CHAPITRE IV - MODELISATION DE LA POLLUTION

CHAPITRE IV - MODELISATION DE LA POLLUTION

1. Rappel des principes et théories de la modélisation

1.1. Définition d'un modèle

La formulation mathématique d'un phénomène physique conduit à l'élaboration d'une ou plusieurs relations entre des variables expliquées et des variables explicatives. Ces relations font intervenir des paramètres liés à la nature du phénomène, à son domaine d'application, Avec un échantillonnage de données relatives aux variables explicatives et en fonction d'un certain nombre de paramètres, un modèle permettra la détermination explicite ou implicite des valeurs de la variable à expliquer. De façon générale, les variables explicatives seront des variables directement mesurables, ou dont les valeurs pourront être facilement connues ou imposées, à l'inverse des variables expliquées dont la connaissance est importante pour la résolution de certains problèmes mais difficilement accessible.

Un modèle est donc une représentation simplifiée, sous forme physique ou mathématique, d'un système complexe dans lequel les réponses produites par des sollicitations externes sont difficilement prévisibles à cause du très grand nombre de facteurs mis en jeu. Un modèle mathématique est, d'après Karplus (1983) :

"un ensemble d'équations caractérisant un système réel, appelé prototype, de telle sorte qu'au moins un certain nombre de liens entre des sollicitations externes et des réponses correspondantes soient représentés de façon adéquate."

La représentation d'un système physique apparaît sur la Figure IV.1. Sur cette figure, E représente les sollicitations auxquelles le système est soumis, S est l'image du système, lui-même représenté par des équations, et R équivaut à la réponse du système.

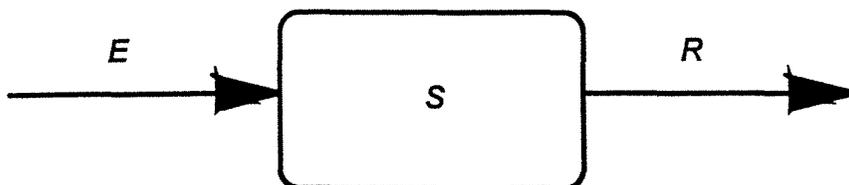


Figure IV.1 : Représentation schématique d'un modèle.

La qualité d'un modèle mathématique, ou sa performance, est sa capacité de prédire un de ces trois éléments lorsqu'on utilise des observations relatives aux deux autres, différentes de celles qui ont servi à élaborer le modèle.

Etant donné que l'image du système S est une représentation, la plupart du temps incomplète du prototype, toute inférence entre E et R basée sur la structure de S sera nécessairement aléatoire et entachée d'erreurs. Il n'est pas possible d'avoir la certitude que les informations disponibles sont une réplique fidèle du système devant être modélisé. Par conséquent, l'élaboration du modèle devra être accompagnée d'une analyse quantitative du risque inhérent à chacune de ses prédictions.

La construction d'un modèle mathématique dépend, en premier lieu, de la connaissance qu'on possède du système réel. En ce qui concerne le système, lorsque E et R sont connues et qu'on ignore complètement les caractéristiques de S , ce modèle porte le nom de *boîte noire* ou de modèle mathématique de type inductif encore appelé en hydrologie *modèle stochastique*. A l'autre extrême, lorsque l'image du système S est connue totalement par les lois qui définissent sa structure et par les liens entre ses composantes internes, il s'agit du modèle du type *boîte blanche* ou modèle à dominance déductive encore qualifié de *modèle déterministe*.

Sur la modélisation en assainissement urbain, Hémain (1991) rappelle que les modèles déterministes peuvent être de nature empirique, mécaniste ou conceptuelle. Dans le premier cas, les relations entre variables sont déduites des observations par des techniques d'identification souvent statistiques, comme cela sera présenté par la suite. Les modèles mécanistes découlent d'une analyse physique et théorique plus ou moins simplifiée des phénomènes. Les modèles conceptuels constituent une alternative aux deux précédents (données expérimentales insuffisantes, absence de théorie physique satisfaisante). Ils sont généralement fondés sur une schématisation des phénomènes, les identifiant à des processus de transformation entrée-sortie. Le plus souvent, cette transformation est pré-définie en s'appuyant sur une représentation schématique globale des phénomènes, propre au concepteur, tout en respectant certains principes fondamentaux.

Entre ces diverses situations extrêmes se trouve la plupart des systèmes physiques. En hydrologie, bien qu'il ne soit pas possible de définir complètement l'image du système, il est possible de connaître un grand nombre de ses composants ainsi que leurs liens structuraux.

Dans tous les cas, l'élaboration d'un modèle mathématique et l'évaluation numérique de ses paramètres s'appuient sur l'exploitation de données expérimentales. On voit bien que modèles et mesures sont indissociables. Dans bien des cas, la qualité d'un modèle réside dans l'adéquation, l'étendue, la fiabilité et la précision des mesures qui ont servi à son élaboration, ainsi que son calage et sa validation.

1.2. Etapes dans l'élaboration d'un modèle mathématique

La construction d'un modèle mathématique doit suivre les étapes suivantes : une fois le modèle identifié et calé, une étude de sensibilité devra être menée, enfin il devra être validé et les limites d'application devront être fixées.

1.21. Identification.

L'identification est l'analyse de la structure du modèle et des liens internes entre ses éléments. A cette étape, le nombre de variables est défini et les hypothèses simplificatrices du modèle sont posées en fonction des objectifs visés et de la précision des résultats recherchée.

1.22. Adéquation.

1.221. Calage

Quel que soit le type de modèle, le calage est une opération visant à déterminer les valeurs des paramètres, de façon à ce que la modélisation satisfasse à l'observation du phénomène qu'elle doit représenter. Lors de la résolution du problème, les paramètres prennent des valeurs numériques particulières. La plupart du temps, ce sont des constantes. La nature de ces paramètres est variable, il peut s'agir de grandeurs mesurables, d'exposants, de coefficients de dimensions connues, ou simplement de coefficients empiriques...

En général, il existe deux façons d'estimer les paramètres à partir d'un échantillon, la manière passive et la manière active. Dans la première, les coefficients des équations sont évalués, par méthodes statistiques, à partir des couples *E-R* disponibles. Dans la seconde, une méthode sélective donne un poids spécifique plus grand à certaines observations. Dans le cas de l'utilisation de modèles obtenus par voies conceptuelles, les valeurs numériques de certains paramètres pourront être bornées dans les limites du domaine d'évolution des variables explicatives ou expliquées.

On a pu constater que les données d'une campagne de pollution sont souvent peu nombreuses. Outre le fait que la critique des données peut conduire à en éliminer certaines, le fait d'en réserver une partie, à des fins de vérification, peut donner lieu à une perte significative d'informations, sans que l'on puisse en juger a priori. Ainsi, pour remédier le manque de données, il est possible d'utiliser diverses techniques - *Bootstrap*, *Jackknife* - (Lebart, 1995) pour la constitution d'échantillons tests. Il sera alors possible de juger, a posteriori, des effets éventuels des divers échantillons sur les valeurs des paramètres du modèle. Si les valeurs sont très différentes, le calage n'est pas significatif, et peut être dû à la perte d'informations résultant de la troncature de l'information. Cela peut aussi être lié au poids d'une donnée aberrante, ou encore être dû au fait que le modèle est inadéquat.

Signalons qu'il ne faut pas perdre de vue que chaque étape de la modélisation fait apparaître des erreurs ou incertitudes qui auront une grande influence sur la fiabilité du modèle.

1.222. Critère de calage

Juger de l'adéquation d'un modèle conduit nécessairement à la recherche de valeurs optimales de ses paramètres, au regard d'un critère de calage.

Le critère est traduit généralement en terme d'écart entre des valeurs observées et les valeurs correspondantes calculées par le modèle. La fonction F ainsi définie, s'intitule fonction d'écart, fonction critère ou encore fonction d'objectif. Un ajustement sera le meilleur lorsque la fonction critère sera minimale. Compte-tenu de la diversité des phénomènes étudiés, il n'existe pas de catalogue des fonctions critères utilisables. Le choix de la fonction critère reste donc assez subjectif.

La fonction critère choisie, il s'agit alors d'en rechercher la valeur optimale par la recherche d'un jeu particulier de paramètres. Compte-tenu de la formulation de cette fonction, cela revient à obtenir des valeurs calculées égales ou les plus proches des valeurs observées. Cette opération s'effectue par itérations successives.

1.23. Sensibilité et erreurs

Il s'agit d'étudier le comportement du modèle aux variations de ses paramètres, afin d'en établir éventuellement une hiérarchisation lors du calage. Cette étude pourra donner lieu à de nombreuses applications, en particulier l'incidence des erreurs ou incertitudes de mesure sur les variables de calcul.

Diverses erreurs peuvent entacher un modèle, les principales sont :

↳ les *erreurs d'observations* résultant d'un mauvais plan d'expérimentation qui conduisent à retenir des variables qui ne sont pas représentatives du phénomène étudié. Elles donnent généralement lieu à une modélisation et des corrélations erronées. Ces erreurs sont particulièrement importantes dans le cas de modélisation empirique, et ne permettront pas de généralisation.

↳ les *erreurs de mesures* liées au matériel installé pour l'expérimentation, aux enregistrements et aux dispositifs de mesures.

↳ les *erreurs de modélisation* mettant en oeuvre des modèles inadaptés ou trop simplifiés pour représenter le phénomène.

↳ les erreurs résultant de l'emploi d'une mauvaise technique de résolution.

Considérant l'ensemble des erreurs susceptibles d'être commises, il est illusoire de vouloir prétendre qu'un modèle assure une restitution exacte du phénomène, mais il doit être le plus représentatif possible. La précision raisonnable, que l'on peut attendre, sera par exemple équivalente à celle obtenue pour la mesure des observations.

Compte tenu du nombre d'erreurs ou d'incertitudes possibles, la procédure de calage des paramètres d'un modèle est une opération délicate, nécessitant une analyse préalable des conditions et des limites de ce calage.

1.24. Validation et limite d'application

La qualité d'un modèle se mesure par les résultats de sa validation. Celle-ci consiste à comparer la réponse théorique, obtenue par le passage d'une sollicitation expérimentale à travers l'image du système S modélisé, avec cette même réponse, obtenue par des observations directes. Il faut souligner que les valeurs des sollicitations et des réponses utilisées pour la validation doivent être différentes de celles qui sont utilisées pour la calibration du modèle. La constitution des deux groupes de valeurs se fait par tirage au hasard.

Lorsque le fait de réserver une partie d'un échantillon à des fins de validation risque d'entraîner une erreur au moment du calage du modèle, il est aussi possible de constituer, par tirage au hasard, plusieurs jeux d'échantillons tests pour le calage et la validation. Il faut ensuite juger du calage.

Tout modèle mathématique doit spécifier clairement le cadre dans lequel il a été élaboré et, de façon hiérarchique, les objectifs visés. Avec cette information, l'utilisateur pourra connaître le champ d'application réel et les limites physiques ou analytiques au-delà desquelles l'usage du modèle peut devenir hasardeux ou inadéquat.

2. Modélisation de la pollution

2.1. Principaux mécanismes de la production de pollution

Les principaux phénomènes et mécanismes de formation de la pollution, en hydrologie urbaine et par temps de pluie, sont représentés par la Figure IV.2.

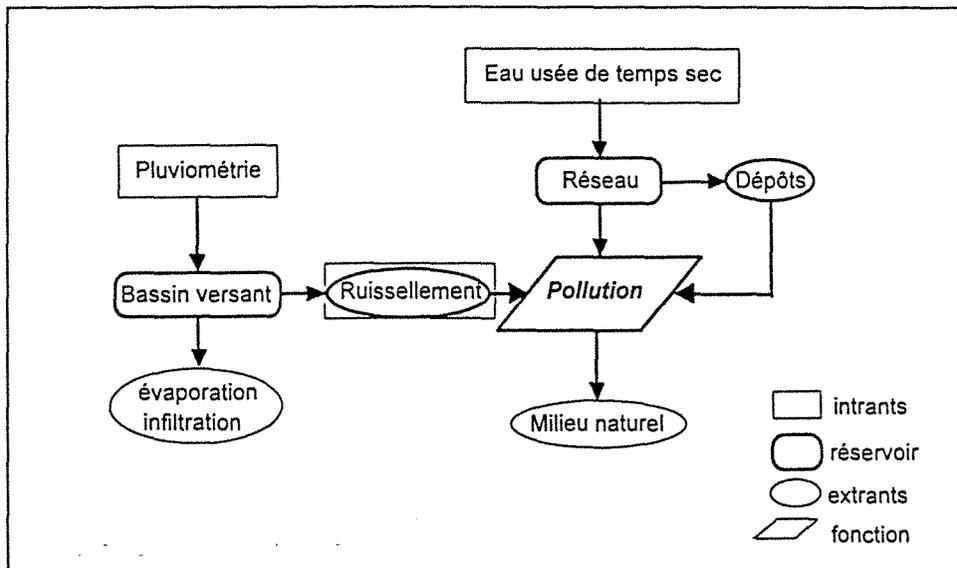


Figure IV.2 : Représentation très simplifiée des différents mécanismes producteurs de pollution en assainissement urbain.

Dans cette étude nous nous intéressons à la production de pollution à la suite d'un événement pluvieux dans son ensemble. Nous ne nous intéresserons pas aux pertes avant ruissellement, ni aux pertes dans les modèles, que nous avons considéré par défaut comme étant nulles. Il nous importe peu de connaître ou de décrire les variations au sein même d'un événement et de reconstituer le pollutogramme. Nous nous plaçons à une échelle de temps en rapport avec la durée de l'événement et/ou la durée du temps sec précédant la pluie, selon le phénomène modélisé de façon à le décrire dans son ensemble. Nous cherchons à modéliser la production de MES, issue de la mobilisation sur le bassin versant de la pollution de surface par la pluie, additionnée de la production en MES de temps sec, qui se retrouvent à l'exutoire du **réseau unitaire** à la suite d'un événement pluvieux.

Nous ne nous intéresserons donc pas à la modélisation des pertes avant ruissellement (interception par les végétaux, évaporation, infiltration...), ni à la modélisation du ruissellement lui-même, ni même au transport dans les réseaux qui ne seront pas non plus abordés dans ce travail.

Compte tenu de ces définitions, nous avons choisi d'adopter des **modèles conceptuels globaux** pour décrire cette production de pollution.

2.2. Identification des phénomènes et des modèles correspondants

La description des principaux modèles est issue en grande partie de la synthèse réalisée dans ce domaine par Bertrand-Krajewski (1991) rassemblant 309 références bibliographiques.

Deux modèles principaux ont été retenus pour leur simplicité. Il s'agit du modèle SWMM parce qu'il s'agit d'un précurseur initialement développé par les américains, et d'un modèle testé par Servat sur des bassins versants expérimentaux français.

2.21. L'accumulation des polluants en surface.

↳ phénomènes physiques

L'accumulation de la pollution dans un bassin versant urbanisé s'effectue principalement sur les surfaces imperméables, ou rendues comme telles. Ces surfaces imperméables sont constituées pour un fort pourcentage des voiries et parkings, ensuite des toitures. Les polluants se répartissent différemment en fonction de la granulométrie des particules. Les particules fines correspondent à l'essentiel du pouvoir polluant. Ainsi, elles fixent près de 80 % de la pollution par rapport à la pollution totale (Chebbo, 1992).

La modélisation de l'accumulation reste encore assez discutée. Certaines études tendent à montrer une accumulation asymptotique de la pollution sur le site, la limite étant atteinte au bout de quelques jours. Selon les résultats de Sartor *et al.* (1974), cette limite est atteinte au bout d'une dizaine de jours environ. La Figure IV.3, extraite de Servat (1984), illustre ces propos. On a alors un taux d'accumulation journalier décroissant dans le temps. D'autres études préconisent simplement un taux d'accumulation linéaire sans limitation dans le temps.

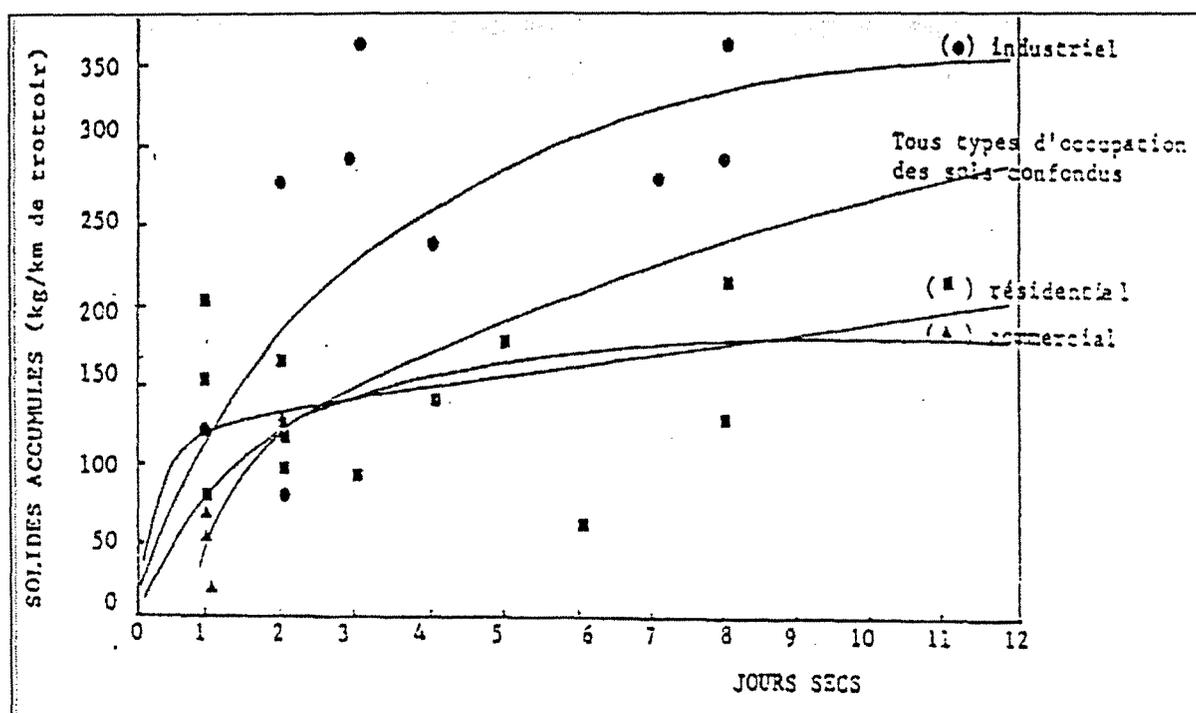


Figure IV.3 : Accumulation des solides dans les rues en fonction de la durée depuis la dernière pluie ou le dernier lavage.

↳ les modèles conceptuels

⇒ **Modèle "Storm Water Management Model"** (SWMM) est un modèle américain qui a été élaboré dans la fin des années 60. Il a ensuite inspiré beaucoup d'autres travaux, devenant ainsi une sorte de référence internationale. L'expression de l'accumulation des polluants à la surface d'un bassin versant est décrite par la relation suivante (Alley and Smith, 1981):

$$\frac{dM_0}{dt} = A - DM_0$$

- avec: M_0 = masse accumulée à l'instant t (kg)
 A = taux massique d'accumulation journalier (kg/j)
 D = coefficient de disparition (j^{-1})

D traduit la disparition des polluants liés à d'autres phénomènes que la pluie tels que le vent, la circulation automobile, le nettoyage des rues.... M_0 croît jusqu'à une limite égale à A/D qui semble être atteinte au bout d'une dizaine de jours. Faisant l'hypothèse qu'il n'y a pas eu de nettoyage des rues, l'intégration de l'expression précédente sur la durée de temps sec précédant l'épisode pluvieux (TS en jours) s'écrit alors :

$$M_0 = \frac{A}{D} (1 - \exp(-D * TS))$$

Dans le logiciel FLUPOL (Bujon, Herremans, 1990) qui reprend le modèle SWMM, A est déterminé en considérant un taux massique d'accumulation journalier par surface active de 6 kg/j/ha-act pour une zone résidentielle discontinue et D est fixé à $0,08 j^{-1}$.

⇒ **Modèle "Servat"** dont l'expression la plus simple est :

$$M_0 = A' * TS$$

- avec: M_0 = masse accumulée pendant la durée de temps sec (kg)
 A' = production de MES pendant un pas de temps (kg/j)
 TS = durée de temps sec entre deux pluies exprimée en nombre de pas de temps (jours)

Des mesures effectuées sur une longue durée (une année environ) sur divers bassins versants donnent des résultats assez satisfaisants pour A' qui est déterminée en considérant qu'elle est comprise entre 1,7 et 3,6 kg/j/ha.

Les hypothèses relatives à l'emploi de ce modèle sont :

- un taux massique d'accumulation constant des MES en surface,

- une masse initiale accumulée sur le bassin versant, égale à la masse finale sur une longue durée.

2.22. Les dépôts dans les réseaux

↳ phénomènes physiques

Dans les réseaux d'assainissement unitaires, on observe fréquemment des dépôts, en particulier lorsque les pentes des réseaux sont faibles ou encore lorsque les vitesses sont peu élevées. Ces dépôts sont à l'origine de problèmes d'ordre divers (CIRIA 1987, Artières 1987):

- ⇒ réduction des sections et des débits dans les ouvrages,
- ⇒ augmentation de la rugosité,
- ⇒ augmentation brutale de la pollution lors de fortes pluies par remise en suspension,
- ⇒ fermentation accompagnée d'odeurs.

L'origine des dépôts a deux provenances : les rejets domestiques de temps sec et l'apport de solides durant la période de pluie provenant de la surface du bassin versant. Lorsque les solides entrent dans le réseau, ils sont soit amenés jusqu'en sortie, soit ils se déposent dans les collecteurs lorsque le débit redevient plus faible. Ce sont les conditions géométriques et hydrauliques qui conditionnent le devenir des dépôts.

C'est en temps de pluie, lorsqu'il y a augmentation des vitesses et des débits, que peuvent être réunies les conditions suffisantes pour la remise en suspension des dépôts. L'importance de cette dernière dépend principalement de la périodicité des fortes pluies et de leur intensité.

On peut observer ainsi une combinaison complexe de phénomènes d'érosion et de sédimentation sur un même événement.

↳ un modèle conceptuel : Modèle de "Stotz et Krauth".

Stotz et Krauth (1984, 1986) et Krauth et Stotz (1985) se sont intéressés à l'évolution des dépôts de temps sec dans les réseaux d'assainissement. Ces auteurs ont proposé une formule pour estimer la quantité de dépôt remis en suspension par augmentation de débit :

$$E = \alpha * TS^k$$

- avec:
- E = quantité de dépôts entraînée par le flot (g/l)
 - $\alpha = 0,65 e/l$ (e=nombre d'habitants, l=longueur des collecteurs) (m^{-1})
 - TS = durée de temps sec (h)
 - $k = 0,74 * \tau_0^{-0,716}$
 - τ_0 = contrainte de cisaillement due à l'écoulement (N/m^2)

Pour une remise en suspension, les auteurs préconisent que τ_0 soit au moins égale à 2 N/m².

Le flot de rinçage n'est pas systématique, et ne se produit pas si :

- les pluies sont peu intenses,
- la période de temps sec est courte.

2.23. La mobilisation de la pollution de surface par la pluie

↳ phénomènes physiques

La pollution accumulée à la surface du sol, est reprise au cours des événements pluvieux pour être entraînée vers le réseau d'assainissement. Ces phénomènes d'entraînement sont particulièrement complexes à modéliser, mais sont déterminants pour l'évaluation de la pollution des eaux de ruissellement (surtout pour les MES) avant leur arrivée dans les collecteurs.

Au stade actuel des recherches, de nombreux auteurs qui ont travaillé dans ce domaine, ont montré que l'entraînement en surface de bassin versant des matières en suspensions est étroitement lié à certaines caractéristiques de la pluie et du ruissellement. Les principales variables sont :

- ⇒ l'intensité moyenne ou maximale de la pluie
- ⇒ la hauteur de pluie
- ⇒ la durée de la pluie
- ⇒ le débit de pointe du ruissellement
- ⇒ le volume ruisselé
- ⇒ la topographie
- ⇒ les caractéristiques des dépôts.

Cette liste n'est pas exhaustive, mais tous s'accordent à dire que la mobilisation de la pollution de surface dépend de l'impact des gouttes de pluie sur le sol et de leur capacité à l'arrachement des particules, le transport étant assuré par le ruissellement de surface.

↳ les modèles conceptuels globaux

⇒ **Modèle "Storm Water Management Model" (SWMM).**

Considérant que la vitesse du phénomène d'érosion et d'entraînement est proportionnelle à M_0 , la masse en kg de particules accumulée en surface, et à l'intensité de la pluie, on peut écrire :

$$\frac{dM_0}{dt} = -K_e I(t) M_0$$

avec: M_0 = masse accumulée pendant la durée de temps sec (kg)

K_e = coefficient d'altération (mm⁻¹)

$I(t)$ = intensité de pluie (mm/h)

Dans le modèle SWMM, K_e a été estimé à 0,18 correspondant à une pluie de 12,7 mm/h pendant une heure qui aurait entraîné 90% de la pollution (Jewel and Adrian, 1978). C'est cette valeur de 0,18 qui sera retenue par défaut.

En supposant que l'intensité de la pluie est constante et en intégrant sur la durée de l'événement, on obtient la masse de dépôt résiduel et, par différence, on en déduit la masse entraînée M dans le réseau à partir de M_0 .

$$M = M_0 * (1 - \exp(-K_e I * \Delta t))$$

avec: M = masse entraînée (kg)

Δt = durée de l'événement pluvieux (h)

Notons que dans ce cas $I * \Delta t = H_{tot}$ (Hauteur totale de pluie tombée durant l'épisode pluvieux).

Différentes adaptations par introduction de coefficients correcteurs ont été proposées pour tenir compte, par exemple, de pluies très faibles ou très fortes. Pour prendre en compte la fraction en masse d'un polluant (DCO, DBO₅, NTK...) dans les MES, d'autres coefficients ont été introduits.

⇒ Modèle de "Servat"

Servat (1984) a proposé cinq expressions différentes de modèles globaux permettant de passer directement de la masse disponible en surface à la masse entraînée à la sortie du réseau. D'après ses conclusions, le modèle le plus performant est le suivant :

$$M = K * M_0^a * I_{\max 5}^b * V_r^c$$

avec: M = masse entraînée (kg)

M_0 = masse disponible sur le bassin versant après la durée de temps sec entre deux pluies (kg)

K, a, b et c = coefficients numériques à ajuster

$I_{\max 5}$ = intensité moyenne maximale de pluie sur 5 min (mm/h)

V_r = volume ruisselé (m³)

Les résultats obtenus par Servat (1984) ont été jugés satisfaisants pour ce modèle. Il a cependant observé que la reproduction des masses observées pour les petits événements est assez délicate du fait d'une méconnaissance, dans ce cas, de l'influence relative de l'une ou l'autre des variables. Pour les événements importants, il a obtenu jusqu'à 30% d'écart entre valeurs observées et valeurs calculées.

Il existe d'autres modèles de mobilisation de la pollution de surface, dont nous ne ferons que signaler l'existence. Nous ne les avons pas retenus en raison de leur complexité ou des paramètres qu'ils utilisent. Il s'agit des modèles de Brombach, de Göttle, NPS (Non Point Source), MOSQUITO, HLOAD ou encore le modèle de Driver et Troutman (Bertrand-Krajewski, 1991).

2.24. L'apport de temps sec

Les apports de la pollution domestique et industrielle ont été quantifiés au cours de nombreuses études. Dans le cas présent, nous ne nous intéresserons qu'à la pollution domestique, puisqu'il n'existe pas d'industrie sur Entzheim.

Ainsi, il est admis que les valeurs moyennes de production de pollution sont de l'ordre de (Bourrier, 1985) :

- ⇒ 150 à 350 l/hab/j pour les débits selon la taille des agglomérations,
- ⇒ 400 mg/l ou 60g/hab/j pour l'apport en MES,
- ⇒ 40 g/hab/j pour l'apport en sable.

L'apport M' de temps sec pendant la durée de l'épisode pluvieux peut alors se formuler de la façon suivante :

$$M' = m * \text{Durée}$$

avec : M' = masse de MES issue de la collecte de la pollution domestique pendant la durée de l'événement pluvieux (kg)

m = production moyenne journalière de pollution domestique (déterminée en considérant 0,060 kg/hab/j) (kg/j)

Durée = durée de l'épisode pluvieux (en jours)

On constate habituellement que l'apport en MES issu des eaux usées de temps sec, présente une bonne corrélation avec les débits. Ainsi, si le débit augmente, il y a simultanément augmentation de la concentration en matières solides.

Pour terminer ce paragraphe, rappelons que l'énumération faite ici, des modèles relatifs aux différents phénomènes qui nous intéressent (accumulation, mobilisation, dépôts, temps sec....), est loin d'être exhaustive et qu'il en existe beaucoup d'autres. Les modèles que nous venons de présenter sont ceux qui vont nous servir pour modéliser la production de pollution lors d'un événement pluvieux, comme nous allons le voir dans le paragraphe suivant. Ils ont été retenus pour leur relative simplicité,

mais aussi parce qu'ils permettent de modéliser la production de MES à l'aide de paramètres strictement hydrologiques.

2.3. Modèles et paramètres retenus

2.3.1. Construction des modèles

Pour la modélisation de la production de pollution sur Entzheim, il faut prendre en compte les 4 phénomènes décrits au paragraphe 2.2..

Dans les modèles de mobilisation des polluants en surface, M_0 désigne, dans le modèle SWMM, la masse accumulée pendant la durée de temps sec précédant l'épisode pluvieux, alors que M_0' désigne la masse disponible sur le bassin versant après la durée de temps sec entre deux pluies. La nuance entre les deux expressions réside dans la prise en compte d'un stock résiduel éventuel disponible à la suite d'un événement pluvieux.

Dans le cas présent, compte tenu des mesures dont nous disposons, il est difficile de connaître l'état exact de la surface au moment du début de la pluie. Nous avons donc postulé, que l'événement pluvieux précédant celui considéré, avait entraîné la totalité de la pollution disponible en surface. Ainsi, le stock disponible correspond à l'accumulation pendant la durée de temps sec.

Disposant de deux modèles d'accumulation des particules en surface et de deux modèles d'arrachage, il a été possible de composer 4 modèles de mobilisation de la pollution de surface par la pluie. Si l'on tient compte de l'érosion des dépôts dans les réseaux et si l'on prend en compte les apports de temps sec, les équations de modélisation obtenues sont résumées dans le Tableau IV.1 :

Dénomination des modèles	MES _{tot} = masse de MES en kg
SWMM-SWMM	$MES_{tot} = \frac{A}{0,08} (1 - \exp(-0,08 TS)) * (1 - \exp(-K_e \Delta t)) + \alpha * TS^k + m_{durée}$
Servat-SWMM	$MES_{tot} = A' TS * (1 - \exp(-K_e \Delta t)) + \alpha * TS^k + m_{durée}$
SWMM-Servat	$MES_{tot} = K \left(\frac{A}{0,08} (1 - \exp(-0,08 TS)) \right)^b * I_5^c * V_r^d + \alpha * TS^k + m_{durée}$
Servat-Servat	$MES_{tot} = K (A' TS)^b * I_5^c * V_r^d + \alpha * TS^k + m_{durée}$

Tableau IV.1 : Equations complètes des modèles de production de pollution suite à un épisode pluvieux.

Pour l'ensemble de ces équations, les variables et paramètres sont ceux décrits au paragraphe 2.2.. Les paramètres sont exprimés dans les mêmes unités.

2.32. Valeurs appliquées à certaines variables et certains paramètres spécifiques aux modèles

↳ les variables A et A'

Faisant l'hypothèse que le stock résiduel est supposé nul à la fin de la pluie précédente, les paramètres A du modèle SWMM et A' du modèle "Servat" représentent en réalité la même variable : le taux massique d'accumulation journalier de la pollution sur le bassin. Pourtant l'estimation selon le modèle considéré de la valeur à retenir pour ce paramètre est différente. La Figure IV.4 indique les variations de M_0 suivant les valeurs retenues pour A et le modèle considéré.

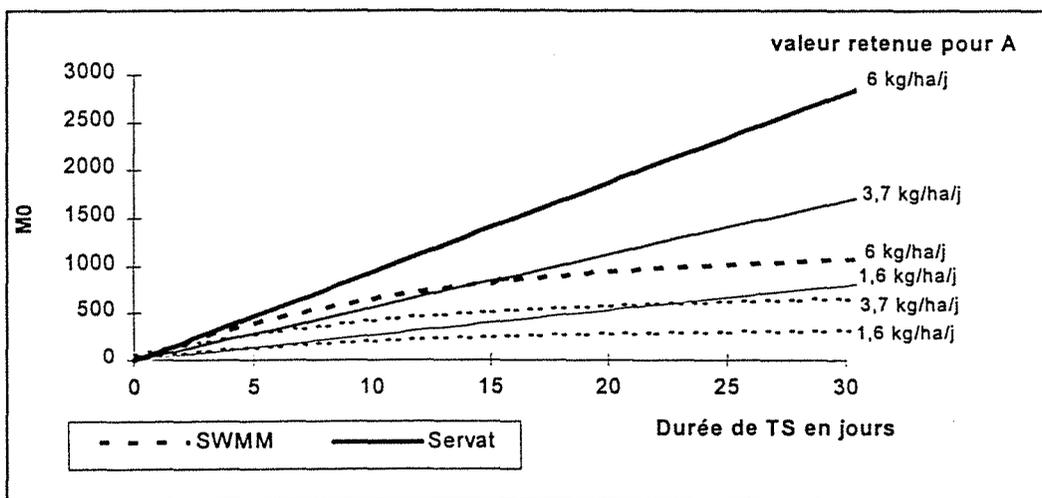


Figure IV.4 : Comparaison des variations de M_0 suivant l'usage du modèle SWMM ou Servat et selon la valeur retenue pour A

Sachant que la surface du bassin versant de Entzheim est de 40 ha et que le coefficient d'imperméabilisation est de 0,39, nous prendrons donc $A=A'=6 \cdot 40 \cdot 0,39 = 93,6$ arrondi à 90 kg/jour. Le calage des modèles conduira aux corrections nécessaires s'il y a lieu.

↳ le paramètre K_e

Ce paramètre a été fixé par défaut à 0,18 dans le modèle SWMM (Cf. § 2.22). Compte tenu du mode de détermination empirique de la valeur de ce paramètre, nous avons choisi de lui permettre une variation de $\pm 25\%$ au cours du calage des modèles.

↳ le paramètre H_{tot}

Comme nous l'avons déjà signalé, dans l'intégration du modèle SWMM pour l'arrachage, la multiplication $\Delta t \cdot I$ représente la hauteur totale de pluie tombée durant l'épisode pluvieux. Disposant directement de cette variable sur les échantillons, nous l'avons introduite dans les équations.

↳ la variable V_r

Le modèle "Servat" pour l'arrachage des particules fait intervenir le volume ruisselé. Lors de la constitution de l'échantillon de pollution nous disposons de cette variable. Mais comme l'objectif est de prédire des informations relatives à la pollution simplement à partir de données de pluviométrie, nous avons choisi de n'introduire dans les équations que des variables de ce type. Nous avons donc remplacé V_r par une valeur approchée, qui est la multiplication de la hauteur totale de pluie tombée par la surface active, soit $H_{tot} * 0,40 * 0,39$ ce qui, arrondi et ramené aux bonnes unités, est égal à $160 * H_{tot}$.

↳ les paramètres K, a, b, c

Le modèle de "Servat" pour l'arrachage fait apparaître les coefficients a , b et c , dont les variations ont été bornées entre 0 et 1 lors du calage des modèles. Les variations du paramètre K sont sans contrainte.

2.33. Expression des modèles testés

Le phénomène de dépôts est nettement présent sur le site d'Entzheim et est la cause de bien des "tracas" quant à l'interprétation des données de pollution. Les premiers calages ont montré que l'introduction du modèle de "Stotz et Krauth", comme cela a été envisagé au paragraphe 2.31., était difficile, voire impossible. Aussi, en raison de la complexité de ce phénomène et des difficultés à distinguer la part représentative des dépôts dans chaque événement, ce terme a été volontairement retiré des équations du Tableau IV.1.

Les expressions des modèles testés et les paramètres à ajuster sont répertoriés dans le Tableau IV.2.

Dénomination des modèles	MES _{tot} = masse de MES en kg	Nb de Var.	Nb. de param.
SWMM-SWMM	$MES_{tot} = a_1(1170 * (1 - \exp(-0,08 TS))) * (1 - \exp(-b_1 H_{tot})) + c_1 m_{duré e}$	3	3
Servat-SWMM	$MES_{tot} = a_2(b_2 * 90 * TS)^{c_2} * (1 - \exp(-d_2 H_{tot})) + e_2 m_{duré e}$	3	5
SWMM-Servat	$MES_{tot} = a_3(b_3 * 1170 (1 - \exp(-0,08 TS)))^{c_3} * 15^{d_3} * (160 H_{tot})^{e_3} + f_3 m_{duré e}$	4	6
Servat-Servat	$MES_{tot} = a_4(b_4 * 90 * TS)^{c_4} * 15^{d_4} * (160 * H_{tot})^{e_4} + f_4 m_{duré e}$	4	6

Tableau IV.2 : Expressions mathématiques des modèles testés

2.4. Adéquation

2.4.1. Calibration

N'ayant que peu d'information quant aux domaines de variation possible des divers paramètres, il a été décidé de procéder à un calage événement par événement. On obtient ainsi, pour les paramètres, un jeu d'autant de valeurs qu'il y a d'événements.

D'une manière générale la sensibilité des modèles est plus grande aux paramètres non linéaires, qu'aux paramètres linéaires.

Aussi, nous avons choisi de fixer aux paramètres non linéaires ($b_1, c_2, d_2, c_3, d_3, e_3, c_4, d_4, e_4$) des bornes minimales et maximales correspondant respectivement à 75% de la valeur minimale observée et à 125% de la valeur maximale du jeu de paramètres obtenus. Pour les paramètres linéaires ($a_1, c_1, a_2, b_2, e_2, a_3, b_3, f_3, a_4, b_4$ et f_4) cette plage de variation a été augmentée jusqu'à parfois 200% de la valeur maximale observée. Le choix des coefficients de majoration et de minoration a été réalisé en relation avec l'étude de sensibilité des modèles.

Ces bornes fixées, un nouveau calage du modèle a été entrepris sur l'ensemble de l'échantillon. Ce choix constitue en outre une limite à l'exploitation ultérieure des modèles et de leurs résultats.

L'optimisation de la fonction critère, définie au paragraphe 2.4.2, et des paramètres a été réalisée à l'aide de la fonction Solveur [MICROSOFT ;1992] proposée par le logiciel EXCEL 5.0 sous Windows. Le nombre d'itérations maximum par passe est de 100 (jamais atteint) et la précision recherchée de 0,000 001.

2.4.2. Critère de calage

L'adéquation des modèles a été évaluée au moyen du coefficient de détermination R2 dont l'expression est donnée en Annexe III.1.

Ce qui revient à :

$$R2 = \frac{\text{Variance expliquée par le modèle}}{\text{Variance totale}}$$

L'utilisation du coefficient de détermination R2 comme fonction critère, revient à maximiser le pourcentage de variation expliqué par le modèle par rapport à la variation totale, ou encore à minimiser la somme des carrés des écarts entre la valeur observée et la valeur calculée, comme dans la méthode des moindres carrés. L'avantage de cette fonction est que l'interprétation des résultats est rapide. En effet, comme pour r , plus R2 est proche de 1, meilleure est l'adéquation du modèle.

L'examen de la somme des carrés des écarts divisés par le nombre de valeur (expression en Annexe III.1), nous servira à évaluer le poids spécifique de chaque individu sur le calage des modèles.

La linéarité entre les valeurs observées et les valeurs calculées a été évaluée au moyen du coefficient de corrélation r (l'expression est donnée en Annexe III.1).

Rappelons que $0 < r < 1$, et que plus r est voisin de 1, meilleure est la corrélation.

2.5. Sensibilité

Une étude de sensibilité des modèles a été réalisée pour chacun d'eux. Cette étude a consisté en l'analyse de l'impact sur le modèle d'une erreur commise sur chaque paramètre pris séparément. Des variations de $\pm 5, 10, 25, 50, 100$ et 200% sur la valeur retenue ont été introduites indépendamment pour chaque paramètre, afin de relever l'erreur d'estimation de la pollution et de déterminer ainsi la sensibilité du modèle vis-à-vis du paramètre testé.

2.6. Validation

Compte tenu du nombre relativement restreint d'observations (38 valeurs), nous avons choisi de ne pas scinder l'échantillonnage en deux groupes. Nous avons préféré conserver la totalité des données pour le calage des modèles, de façon à ne pas risquer une perte significative d'informations. Ainsi, aucun échantillon test n'a été constitué.

Compte tenu de la technique de calage et d'encadrement des paramètres, il n'a pas été constitué plusieurs jeux d'échantillons ni pour le calage, ni pour la validation, comme cela est décrit au paragraphe 1.24..

2.7. Limites d'application

Plutôt que des limites d'application, nous définirons des valeurs seuils à partir desquels le modèle n'a plus de raison d'être appliqué. En effet, ces divers modèles ne prennent pas réellement en compte les limites intrinsèques du bassin versant dans le phénomène de production de pollution par temps de pluie.

➤ *Valeur maximale admissible pour la masse totale de MES produite à l'issue d'un événement pluvieux*

Tout en sachant qu'il s'agit de sites différents, les observations recueillies dans le Tableau III.6 (Chapitre III § 2.13) nous permettent d'estimer le seuil de production maximum de pollution pour un événement sur Entzheim comme étant supérieur ou égal à $6\,000\text{ kg}$ ($373 \cdot 0,39 \cdot 40 = 5818$).

Cette valeur peut aussi être approchée en considérant qu'un événement extrême peut remettre en suspension au maximum une quantité de 40 g de MES accumulée par m^2 de surfaces imperméables. Cette valeur a été évaluée à partir des diverses observations faites par Saget (1995). Ainsi le seuil pour les MES tot a été placé à $6\,500\text{ kg}$ ($0,040 \cdot 400000 \cdot 0,39 = 6240$ arrondi à 6500 kg).

➤ **Valeur maximale admissible pour la charge horaire maximale de MES produite à l'issue d'un événement pluvieux**

Ne disposant d'aucune information sur les charges horaires maximales, nous nous sommes ramenés aux informations disponibles sur Entzheim. Le rapport moyen observé de MESTot sur MESmax/h est voisin de 2,8, on retiendra donc comme limite pour les charges maximales horaires (MESmax/h) la valeur de 2500kg ($6500/2,8=2321$ kg arrondi à 2500kg)

➤ **Valeur maximale admissible pour la concentration moyenne maximale en MES au cours d'un événement pluvieux**

Saget a observé des variations de concentration moyenne au cours des événements qu'elle a étudiés allant de 100 à 1000 mg/l avec des maximums au voisinage de 1700 mg/l. Le bilan effectué par Hémain (1985) sur la campagne de mesure de 1982 a conduit à des valeurs de 1 jusqu'à 4 g/l.

Aussi nous retiendrons une valeur de 2500 mg/l comme seuil maximum (ce qui correspond aussi, à la valeur moyenne observée pour les concentrations moyennes additionnée à 5 fois son écart type).

Pour les concentrations instantanées maximales, nous avons calculé sur les échantillons recueillis à Entzheim, un rapport maximum égal à 5 entre la concentration moyenne maximale et la concentration instantanée maximale. Or la concentration instantanée maximale observée sur Entzheim est de 1500 mg/l, ainsi nous retiendrons la valeur de 7500 mg/l ($1500*5=7500$ mg/l) comme seuil pour les concentrations maximales.

La procédure de calage et les modèles, présentés ci dessus, ont été écrits pour déterminer la masse de MES (MESTot) produite à la suite d'un épisode pluvieux. La même procédure et les mêmes modèles ont servi au calage de trois autres variables de pollution (MESmoy, MESmax/h, MESmax), en introduisant des facteurs correctifs liés aux changements de variables.

Le chapitre V qui suit, présente l'ensemble des résultats de calage des 4 variables sur les 4 modèles.

**CHAPITRE V - RESULTATS DE LA MODELISATION ET
CARACTERISATION DE LA POLLUTION**

CHAPITRE V - RESULTATS DE LA MODELISATION ET CARACTERISATION DE LA POLLUTION

Une *première partie* de ce chapitre est consacrée à la présentation des résultats obtenus après calage des différents modèles énoncés au chapitre IV.

Le premier objectif est de prédire, la masse de MES (MES_{tot}) produite suite à un événement pluvieux, variable pour laquelle les modèles ont été établis. Le second objectif est d'examiner la transposition des modèles sur les autres variables MES_{max/h}, MES_{moy} et MES_{max}.

Après la présentation des résultats obtenus pour les MES_{tot} et l'analyse détaillée du comportement des modèles vis-à-vis des paramètres et des variables, une adaptation des modèles aux trois autres variables sera exposée.

Dans l'ensemble, on privilégiera le modèle SWMM-SWMM car ce modèle ne nécessite le calage que de 3 paramètres. C'est le plus simple et il présente des résultats globalement aussi convenables que ceux obtenus avec les autres modèles.

L'objectif ultime est d'approcher la période de retour d'un événement de pollution quel qu'il soit, la *seconde partie* de ce chapitre y sera donc consacrée.

1. Résultats de la modélisation

1.1. Résultats obtenus pour les MES_{tot}

1.11. Calage des modèles sur l'échantillon de pollution complet

1.111. Détermination des bornes des variables

Ne connaissant pas le domaine de variation des variables relatives à chacun des modèles, nous avons, comme indiqué au Chapitre IV § 2.41, cherché un jeu de valeurs pour chacune des 38

valeurs de MESTot. Nous avons ainsi obtenu un jeu de 38 valeurs de paramètres qui nous a permis de fixer des bornes aux domaines. Rappelons que nous nous sommes fixés de retenir comme bornes $\pm 25\%$ des valeurs maximales et minimales pour les paramètres non linéaires (Chapitre IV. 2.42), et une variation de 200% maximum pour les paramètres linéaires.

Le Tableau V.1 résume les valeurs obtenues pour les 4 modèles testés. Ces résultats sont issus d'itérations successives, en partant toujours des mêmes valeurs d'initialisation (colonnes dép.), et en faisant varier simultanément l'ensemble des paramètres sans les borner. En annexe V.1 figurent le détail des résultats obtenus pour chaque paramètre et chaque événement selon le modèle employé.

SWMM-SWMM					Servat-SWMM					SWMM-Servat					Servat-Servat				
pa	dép.	moy	max	min	pa	dép.	moy	max	min	pa	dép.	moy	max	min	pa	dép.	moy	max	min
a1	1	0,417	1,417	0,06	a2	1	1,329	1,817	1,124	a3	1	0,965	1,081	0,851	a4	1	0,934	1,026	0,82
b1	0,18	0,179	0,419	0,10	b2	1	1,179	1,476	1,062	b3	1	0,979	1,017	0,935	b4	1	0,940	0,985	0,80
c1	1	1,109	3,650	0,90	c2	0,5	0,908	1,319	0,605	c3	0,4	0,277	0,341	0,224	c4	0,4	0,319	0,376	0,23
					d2	0,18	0,214	0,293	0,183	d3	0,8	0,720	0,844	0,517	d4	0,8	0,663	0,782	0,46
					e2	1	2,186	5,914	1,046	e3	0,5	0,343	0,473	0,239	e4	0,5	0,333	0,454	0,16
										f3	1	1,036	1,249	0,964	f4	1	1,073	1,817	0,91

Tableau V.1 : Détermination des valeurs du jeu de paramètres sur les 4 modèles pour MESTot

De façon générale, on constate que les moyennes des 38 valeurs obtenues pour les paramètres sont du même ordre de grandeur que les valeurs de départ. Les valeurs maximales et minimales sont peu étendues pour les paramètres non linéaires. Par contre, on peut observer des maximums relativement élevés pour certains paramètres linéaires, et plus spécialement pour a1, c1 et e2.

1.112. Calage des modèles

Après avoir fixé les bornes de variation des paramètres, nous avons procédé au calage des modèles sur l'échantillon de 38 valeurs de pollution. Le calage a été réalisé en optimisant R2. L'examen de e^2 et r nous apporte d'autres éléments de comparaison des modèles entre-eux. Le Tableau V.2 présente les valeurs des paramètres résultant du calage.

SWMM-SWMM		Servat-SWMM		SWMM-Servat		Servat-Servat	
a1	0,492	a2	3,634	a3	2,162	a4	2,052
b1	0,524	b2	2,952	b3	2,034	b4	1,970
c1	4,247	c2	0,579	c3	0,243	c4	0,269
		d2	0,363	d3	0,451	d4	0,654
		e2	3,709	e3	0,290	e4	0,164
				f3	2,498	f4	3,633
e ²	24100	e ²	23505	e ²	20468	e ²	19817
r	0,60	r	0,59	r	0,64	r	0,65
R2	0,30	R2	0,32	R2	0,41	R2	0,43

Tableau V.2 : Présentation des paramètres résultant du calage obtenus pour MESTot sur l'échantillon de 38 événements

C'est le modèle Servat-Servat qui présente les meilleurs résultats quelle que soit la fonction considérée. Il n'est pas surprenant que les modèles composés d'un arrachage de type "Servat" présentent de meilleurs résultats. Ce sont des modèles à 6 paramètres de calage. Les modèles utilisant le modèle d'arrachage de type "SWMM" n'ont que 5 et 3 paramètres, il serait donc normal qu'ils soient moins précis. En effet, plus il y a de paramètres, meilleur sera le calage, sauf dans le cas où les paramètres sont en limite de domaine de variation. Les résultats sont donc globalement homogènes.

Considérant les valeurs obtenues pour R2, les résultats sont médiocres, puisque les valeurs sont comprises entre 0,30 et 0,43 alors que nous avons obtenu un R2=0,49 pour la régression linéaire sur MESTot (Chapitre III 3.2).

La Figure V.1 compare point par point le cumul des valeurs observées et des valeurs calculées selon le modèle considéré.

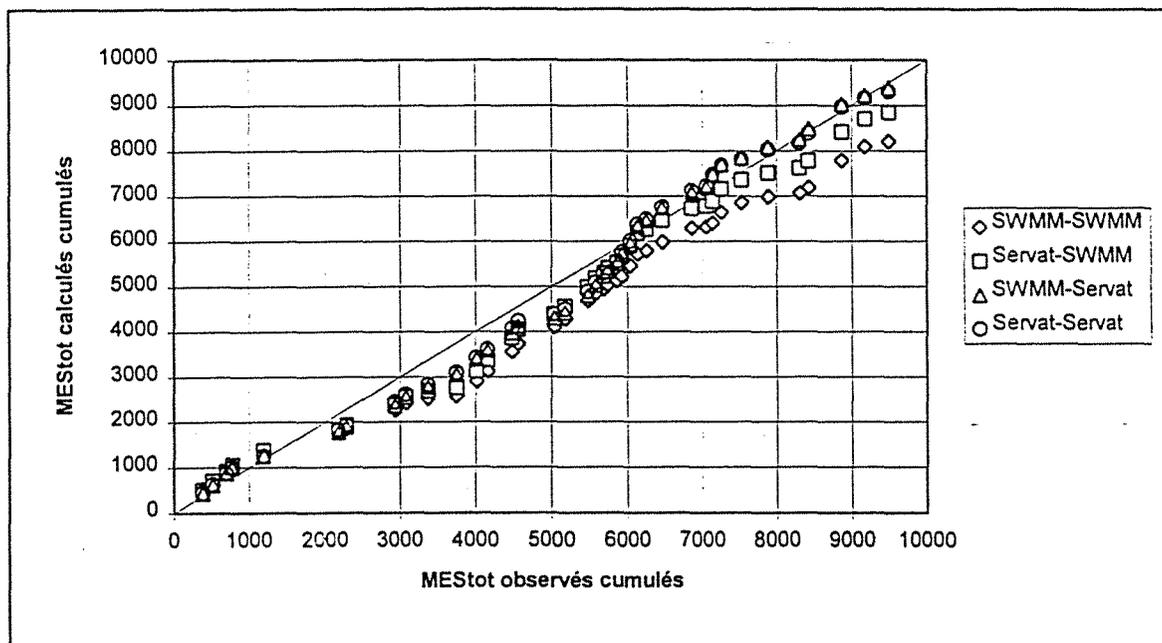


Figure V.1 : Comparaison des modèles calés pour MEstot sur un échantillon de 38 valeurs

Dans l'ensemble on peut voir que les quatre modèles suivent la même variation et conduisent à des résultats concordants. Il n'y a donc pas d'effet de modèle prépondérant. Ils modélisent assez bien le comportement de la production de la pollution, mais ils ont tous tendance à la sous-estimer, surtout pour un arrachage de type "SWMM". L'examen particulier de chaque individu indique plus précisément que ces modèles sous-estiment les valeurs fortes et surestiment les valeurs faibles.

L'examen détaillé des résultats montre que l'erreur maximale commise avoisine les 80%. Au premier abord, cette valeur peut paraître élevée, mais il s'agit de prédiction de pollution à partir de modèle simple. Aussi cette approximation reste correcte.

Les résultats ainsi obtenus ne sont cependant pas entièrement satisfaisants. Malgré la critique minutieuse des données, il est possible que l'une ou l'autre d'entre-elles présente une anomalie, et fausse les résultats des calages, induisant des coefficients de détermination et de corrélation trop faibles. Un ré-échantillonnage, après identification et élimination d'individus suspects, et un nouveau calage devraient améliorer les résultats.

1.12. Calage des modèles sur un échantillon réduit

1.121. Définition du nouvel échantillon de calage

L'analyse statistique présentée au Chapitre III n'a pas permis de mettre en évidence des individus présentant des caractéristiques anormales. Nous allons donc procéder à un ré-échantillonnage en utilisant en partie la technique du "Jackknife" (Voir Annexe III.1 § 5) pour identifier les individus qui influencent sensiblement les résultats de calage du modèle. Parmi les 38 événements nous avons tour à tour supprimé chaque événement pour constituer un échantillon de 37 événements.

Nous avons choisi d'utiliser le modèle SWMM-SWMM pour effectuer ce traitement parce que c'est le modèle le plus simple (3 paramètres de calage), il conduira donc plus facilement à l'identification des événements douteux.

Sur ce nouvel échantillon nous avons effectué le calage du modèle. L'examen des résultats numériques (voir le Tableau complet en annexe V.2), et des graphiques (Figures V.2, V.3 et V.4) indiquant les variations des trois fonctions utilisées pour juger le calage, nous a permis de repérer les individus "suspects".

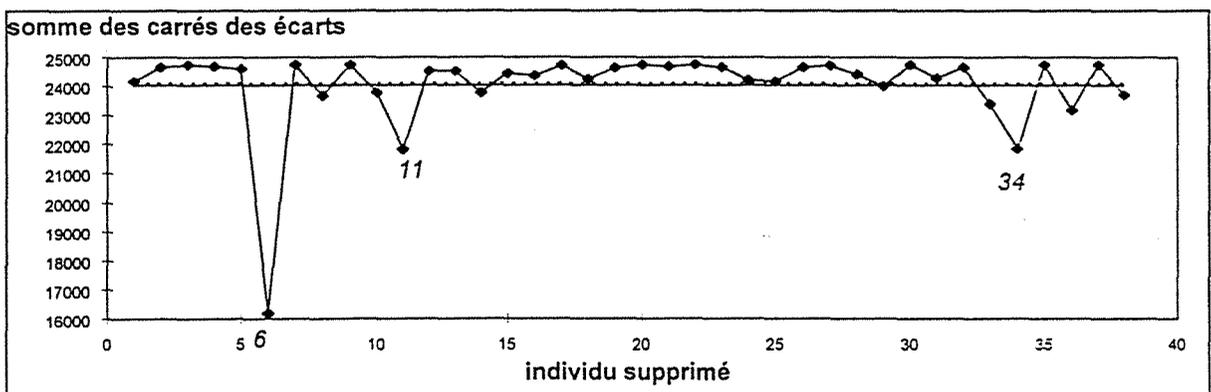


Figure V.2 : Variation de la somme des carrés des écarts après suppression d'un individu sur l'échantillon de MESTot

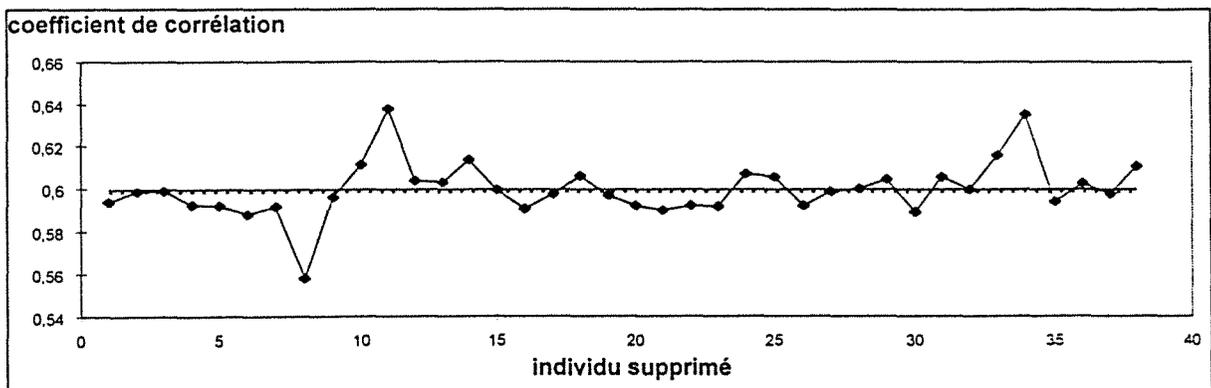


Figure V.3 : Variation du coefficient de corrélation après suppression d'un individu sur l'échantillon de MESTot

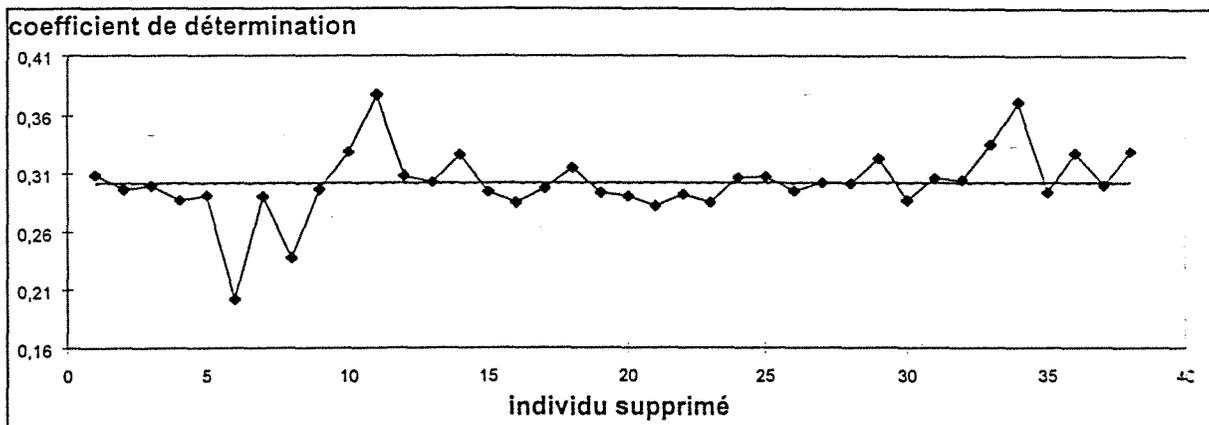


Figure V.4 : Variation du coefficient de détermination après suppression d'un individu sur l'échantillon de MESTot

Sur l'ensemble de ces graphiques, le trait continu représente la valeur de la fonction étudiée sur l'échantillon de 38 valeurs, le trait en pointillé représente la moyenne de la fonction obtenue sur les 38 échantillons.

L'examen du carré des écarts, par rapport à la moyenne, indique une très nette diminution de cette fonction lorsque les individus 6, 11 et 34 sont supprimés, et une diminution plus modérée pour les individus 33 et 36. L'étude du coefficient de corrélation montre une nette augmentation pour les événements 11 et 34, et une augmentation modérée pour le 33, le 14, le 38 et le 10 (classés dans l'ordre d'importance). La suppression des individus 11 et 34 contribue aussi à une forte augmentation du coefficient de détermination, l'élimination des individus 33, 36, 38 et 10 y participe à moindre mesure.

Le Tableau II.2 présentant l'échantillon de pollution utilisé pour le calage des modèles. nous indique que l'individu 6 est l'événement maximum enregistré pour les MESTot. Cet événement ne présente pas d'autres caractéristiques particulières, il n'est donc pas question de l'écartier de l'échantillon. Les événements 11, 33, 34, 38 ne présentent que des valeurs moyennes pour les divers paramètres, mis à part l'événement 11 dont l'intensité maximale (15) est importante.

Ce sont donc ces quatre individus que nous avons choisi d'extraire afin de constituer un nouvel échantillon. Nous justifierons cet écart par les arguments suivants :

↳ Il est possible que pour l'événement 11 la détermination de la masse totale ait été faussée par le fait qu'il s'agisse d'un événement multiplexé.

↳ Outre le fait que le modèle sous estime les valeurs de pollution, il est probable que, pour les événements 32, 33 et 34 qui se succèdent de près dans le temps, il y ait eu remise en suspension des dépôts dans le réseau. Ce phénomène intermittent n'est pas pris en compte par le modèle.

↳ Pour les événements 37 et 38 qui se suivent d'assez près, le modèle considère qu'il y a eu reconstitution du stock de polluant sur le bassin versant, or ceci n'a probablement pas été le cas.

1.122. Calage des modèles sur l'échantillon réduit

Considérant l'échantillon de pollution, réduit des individus 11, 33, 34 et 38, nous avons procédé au calage des modèles. Les résultats figurent dans le Tableau V.3.

SWMM-SWMM		Servat-SWMM		SWMM-Servat		Servat-Servat	
a1	0,468	a2	0,952	a3	2,160	a4	1,689
b1	0,524	b2	0,965	b3	2,040	b4	1,270
c1	4,126	c2	0,867	c3	0,361	c4	0,470
		d2	0,363	d3	0,390	d4	0,377
		e2	4,136	e3	0,194	e4	0,121
				f3	2,498	f4	3,633
e ²	17904	e ²	18532	e ²	18945	e ²	17173
r	0,72	r	0,71	r	0,71	r	0,73
R2	0,51	R2	0,49	R2	0,48	R2	0,53

Tableau V.3 : Présentation des paramètres résultant du calage obtenus pour MESTot sur un échantillon réduit de 34 événements

Comparées aux résultats obtenus avec l'échantillon complet de pollution, les valeurs des paramètres de calage sont très voisines. Seules les valeurs c2 et c4 présentent une augmentation notable respectivement de 50 et 40% qui entraîne, de ce fait, des modifications sur les paramètres a2 et b2, d'une part, et a4 et b4, d'autre part. Les valeurs des fonctions somme des carrés des écarts, coefficient de corrélation et coefficient de détermination sont semblables quel que soit le modèle considéré.

Cette élimination de 4 valeurs (10% des valeurs observées) conduit à une amélioration moyenne de :

⇒ 16% du coefficient de corrélation

⇒ 41% du coefficient de détermination

Les modèles présentent une adéquation identique. On n'observe plus de différence liée au nombre de paramètres du modèle, car ceux-ci sont parfois en butée du domaine de variation que nous nous sommes imposés.

Les Figures V.5, V.6, V.7 et V.8 permettent la comparaison des modèles calés sur le nouvel échantillon avec ceux obtenus sur l'échantillon complet.

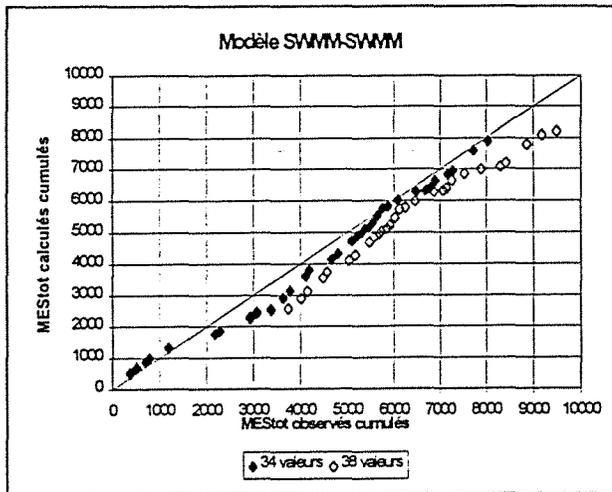


Figure V.5 : Modèle SWMM-SWMM calé sur un échantillon de MESTot réduit

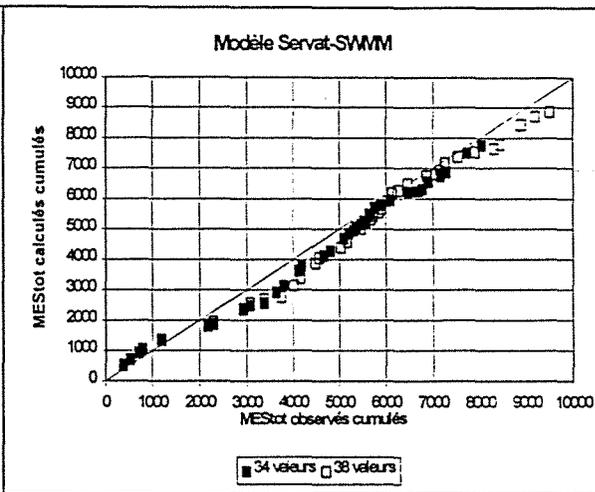


Figure V.6 : Modèle Servat-SWMM calé sur un échantillon de MESTot réduit

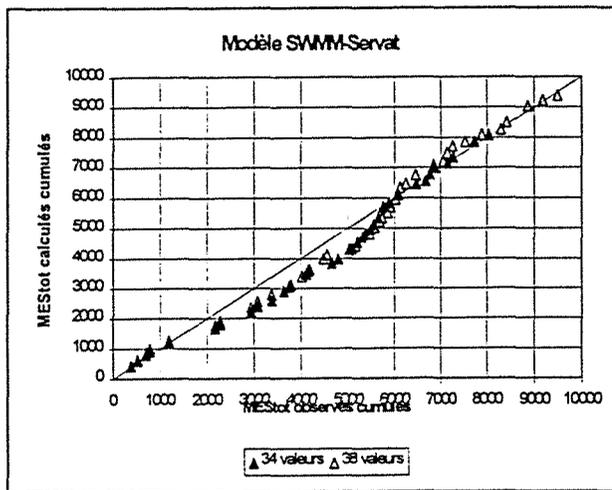


Figure V.7 : SWMM-Servat calé sur un échantillon de MESTot réduit

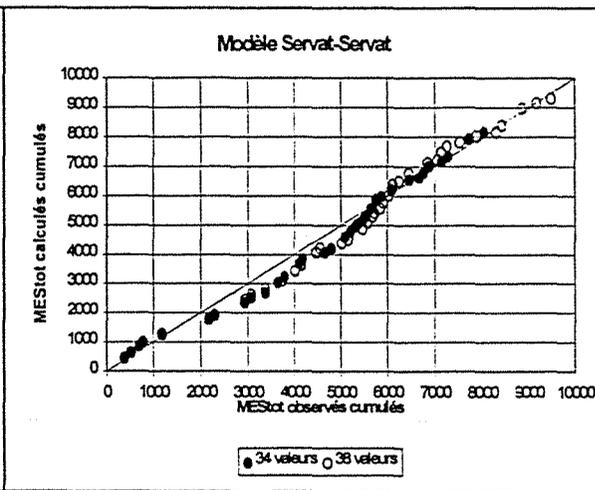


Figure V.8 : Modèle Servat-Servat calé sur un échantillon de MESTot réduit

L'amélioration est très sensible pour les modèles SWMM-SWMM et Servat-SWMM qui se rapprochent de la première bissectrice, bien qu'ils sous-estiment toujours globalement les valeurs de MESTot.

Voyons à présent quelle est l'erreur supplémentaire que nous commettrons sur la prédiction des quatre individus exclus, en utilisant le modèle construit avec les nouveaux paramètres de calage.

Le Tableau V.4 donne la valeur observée en MESTot pour chaque individu en tête de colonnes. Il présente ensuite l'erreur supplémentaire commise (colonne "e sup"), en comparant le résultat de la prédiction du modèle calé avec 38 individus (colonne 38) et celui obtenu à partir de l'échantillon réduit (colonne 34). L'expression de "e sup" est :

$$e \text{ sup} = \frac{\text{col 38} - \text{col 34}}{\text{MES tot observée}} * 100$$

MESTot	11=377			33=355			34=415			38=319		
	e sup	38	34	e sup	38	34	e sup	38	34	e sup	38	34
SWMM-SWMM	0,4	47,8	46,4	2,3	134,6	126,3	-0,9	81,1	84,6	-1,5	114,1	118,9
Servat-SWMM	8,2	78,8	48,0	11,2	159,7	120,0	6,2	112,9	87,0	8,7	148,5	120,8
SWMM-Servat	35,4	267,1	133,8	21,8	240,0	162,7	22,5	165,9	72,4	28,4	161,7	71,2
Servat-Servat	34,3	257,9	128,6	10,5	216,8	179,4	6,7	141,9	114,1	3,1	144,8	134,7

e moyen sup 12,3

e max sup 35,4

Tableau V.4 : Erreur supplémentaire de prédiction sur les quatre individus exclus de l'échantillon MESTot

L'erreur supplémentaire de prédiction commise sur les quatre événements écartés n'excède pas 36% et la moyenne est de 12,3%. L'exclusion de ces individus pour les nécessités du calage n'est donc pas préjudiciable.

1.13. Etude de sensibilité

L'étude de sensibilité doit montrer avec quelle précision il faut connaître les paramètres pour ne pas commettre une erreur de prédiction trop importante. Mais il est clair que pour déterminer les paramètres il faut avoir une idée de la précision à rechercher, donc de la sensibilité du modèle.

L'étude de la sensibilité de chaque modèle a été réalisée à partir de l'échantillon réduit de MESTot.

Les graphiques suivants indiquent l'erreur sur la prédiction de l'échantillon réduit, si l'on commettait des erreurs de ± 5 , 10, 25, 50, et 100% sur les différents paramètres des modèles.

Compte tenu de la constitution des modèles, l'erreur sur la prédiction est toujours de même signe que celle réalisée sur le paramètre considéré. En outre, l'examen général de la répercussion maximale des erreurs, quel que soit le modèle et quel que soit le paramètre, sur la valeur à prédire, n'est pas liée à son importance.

1.131. Modèle SWMM-SWMM

Pour les paramètres a1 et c1 (Figures V.9 et V.11), l'erreur maximale commise varie linéairement avec l'erreur sur le paramètre. Pour certains événements, le rapport entre les deux erreurs est proche de 1 : une erreur de 100% sur ces paramètres entraînera alors une erreur de 100% sur les valeurs prédites.

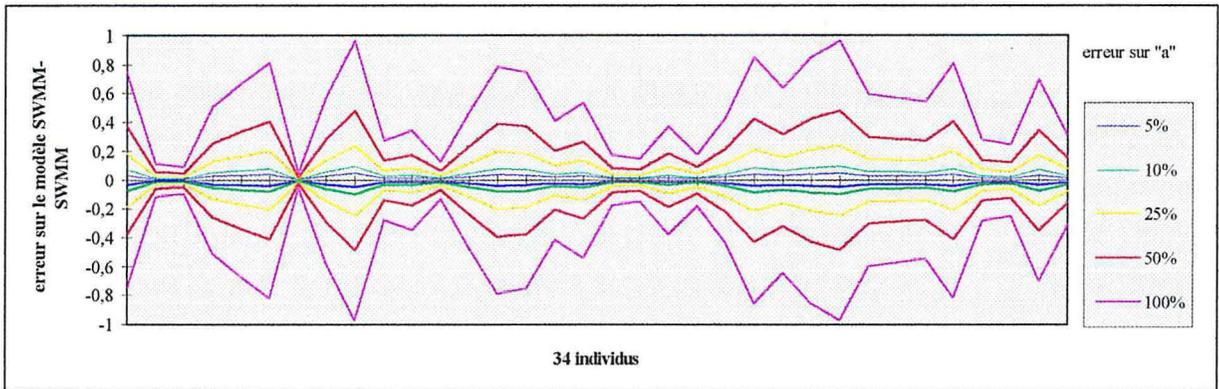


Figure V.9 : Répercussion des erreurs sur "a1" dans la prédiction des MESTot par le modèle SWMM-SWMM

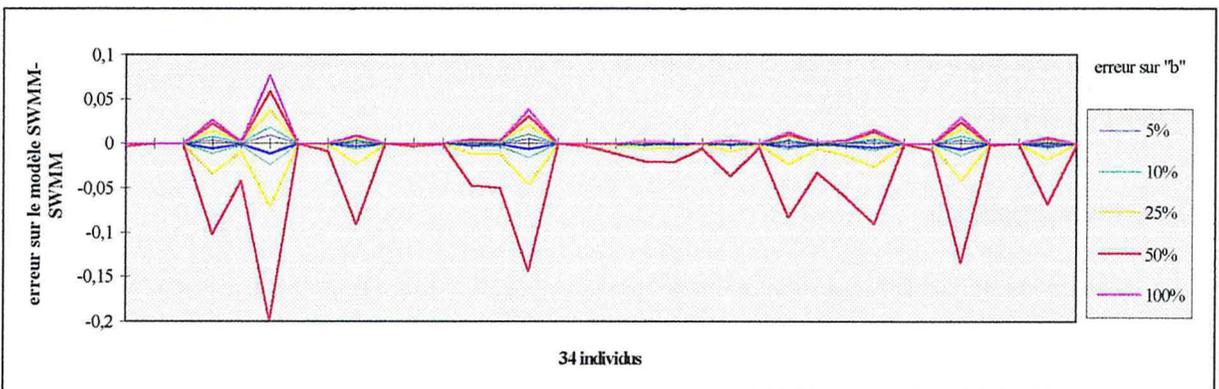


Figure V.10 : Répercussion des erreurs sur "b1" dans la prédiction des MESTot par le modèle SWMM-SWMM

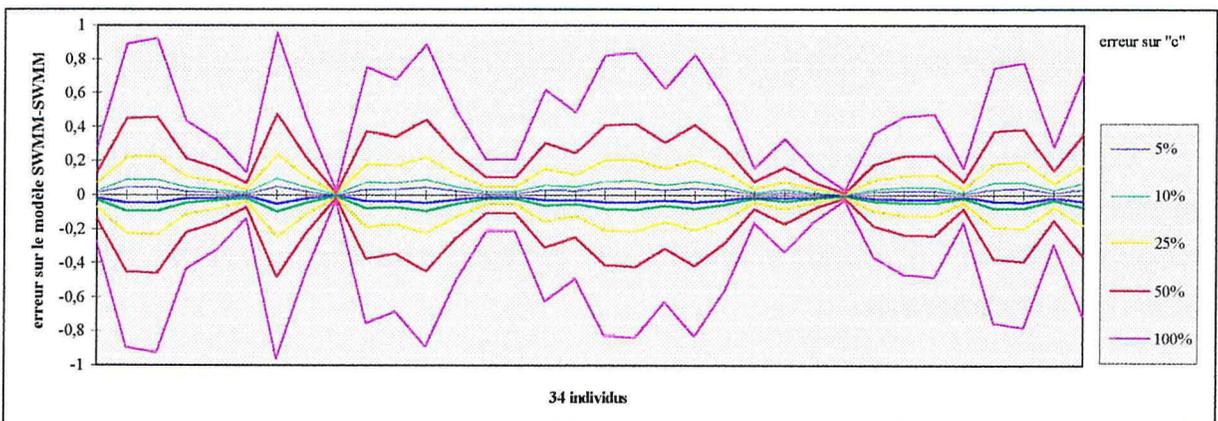


Figure V.11 : Répercussion des erreurs sur "c1" dans la prédiction des MESTot par le modèle SWMM-SWMM

Cette remarque est vérifiée pour l'ensemble des paramètres linéaires, quel que soit le modèle considéré. C'est pour cette raison que les bornes maximales des paramètres linéaires ont été fixées à deux fois la valeur maximale obtenue par le jeu de paramètre de calage au paragraphe 1.11.

Sur ce modèle une erreur commise sur le paramètre b_1 (Figure V.10) n'a que peu d'incidence sur la prédiction des MESTot.

Ce modèle sera donc particulièrement sensible aux erreurs de calage sur les paramètres a_1 et c_1 dont la répercussion se fera de façon linéaire.

1.132. Modèle Servat-SWMM

Les Figures V.12 à V.16 présentent la sensibilité du modèle Servat-SWMM aux paramètres a_2 , b_2 , c_2 , d_2 et e_2 .

Les paramètres a_2 et e_2 sont des paramètres linéaires, leur incidence est celle décrite précédemment.

Le paramètre b_2 varie simultanément avec a_2 et c_2 . La sous-estimation de sa valeur a plus d'incidence qu'une surestimation à l'inverse des variations de c_2 . La sous-estimation de b_2 conduit à une erreur maximale du même ordre de grandeur, alors qu'une surestimation a des répercussions légèrement inférieures. Par contre, une erreur de surestimation sur c_2 est déterminante, une erreur de +25% peut induire une erreur maximale de 200% sur la prédiction de la pollution, alors qu'une sous-estimation de ce paramètre n'entraîne qu'une erreur directement proportionnelle.

Une erreur sur d_2 est plus préjudiciable en sous-estimation qu'en surestimation, sa répercussion sera au maximum égale à celle faite sur le paramètre.

Ce modèle est donc particulièrement sensible au calage de c_2 qu'il faut absolument éviter de surestimer. Il faut également soigner le calage des autres paramètres, plutôt les surestimer que les sous-estimer, l'erreur maximale résultante pouvant être du même ordre de grandeur que celle de départ.

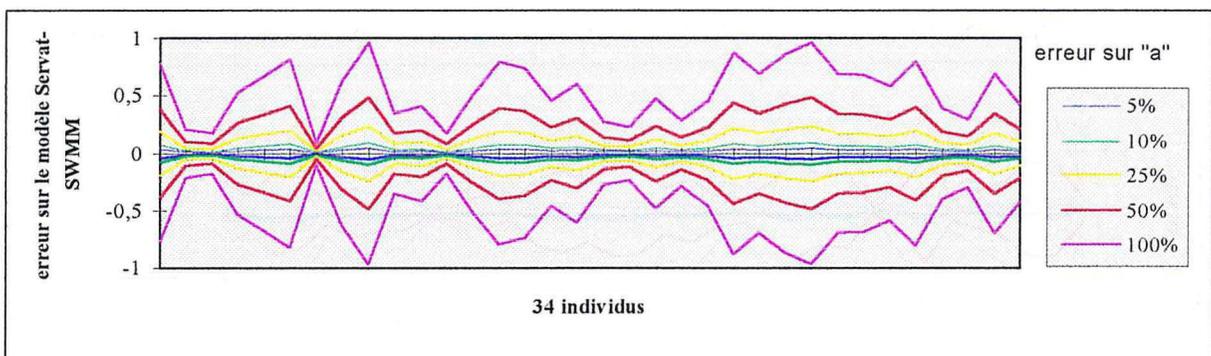


Figure V.12 : Répercussion des erreurs sur "a2" dans la prédiction des MESTot par le modèle Servat-SWMM

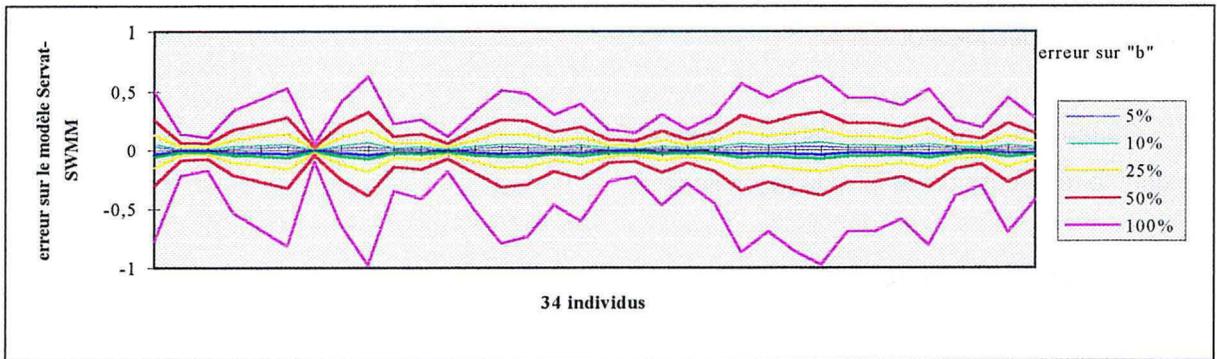


Figure V.13 : Répercussion des erreurs sur "b2" dans la prédiction des MESTot par le modèle Servat-SWMM

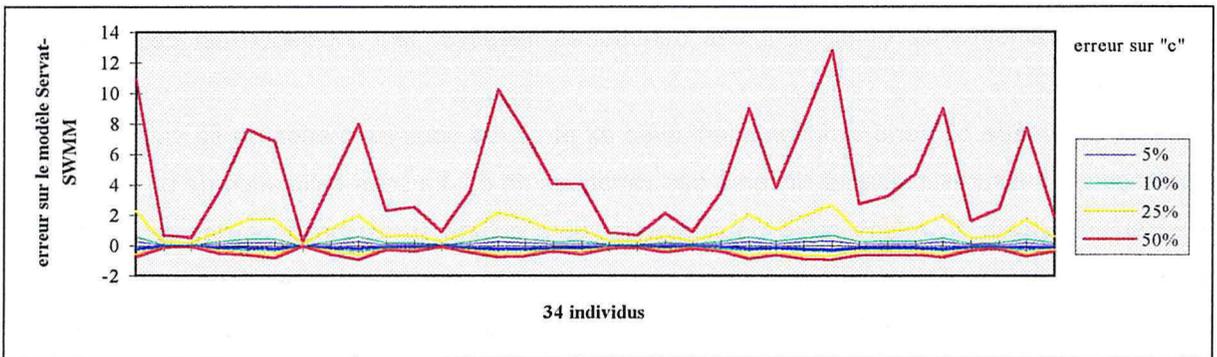


Figure V.14 : Répercussion des erreurs sur "c2" dans la prédiction des MESTot par le modèle Servat-SWMM

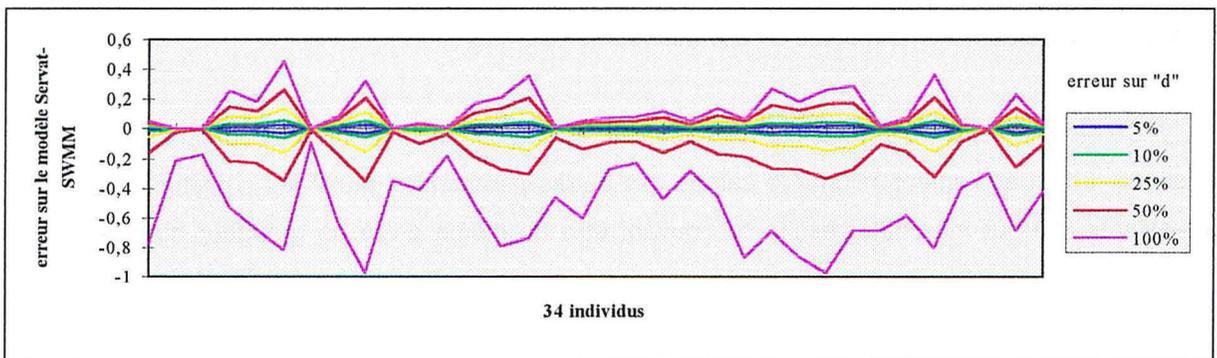


Figure V.15 : Répercussion des erreurs sur "d2" dans la prédiction des MESTot par le modèle Servat-SWMM

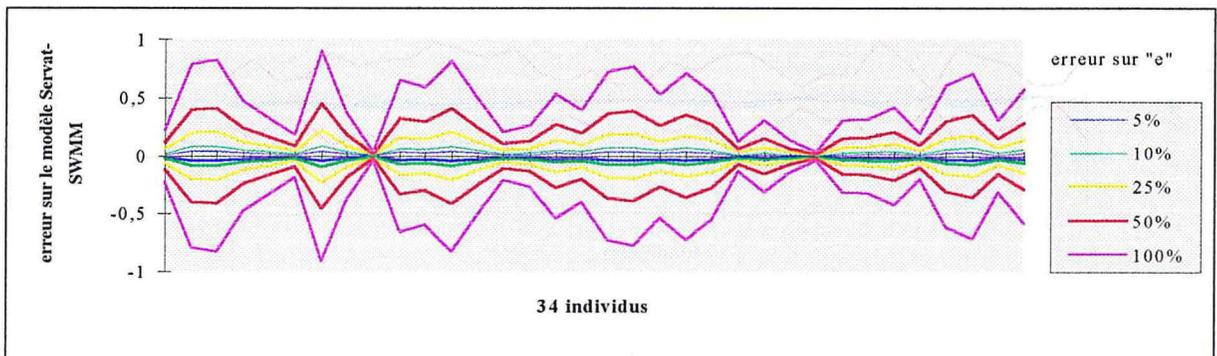


Figure V.16 : Répercussion des erreurs sur "e2" dans la prédiction des MESTot par le modèle Servat-SWMM

1.133. Modèle SWMM-Servat

Les Figures V.17 à V.22 présentent la sensibilité du modèle Servat-SWMM aux paramètres a_3 , b_3 , c_3 , d_3 , e_3 et f_3 .

Les variations et les conséquences d'une erreur sur a_3 , b_3 ou c_3 sont analogues à celles observées sur a_2 , b_2 et c_2 . Ces paramètres remplissent les mêmes fonctions.

Les paramètres d_3 et e_3 sont des puissances, tous les deux sont sensibles à une surestimation, plus particulièrement sur des valeurs de $MESTot$ faibles.

f_3 est un paramètre linéaire.

Ce modèle nécessite une attention particulière pour le calage des paramètres de puissance (c_3 , d_3 , e_3) pour lesquels une erreur peut être parfois triplée sur le résultat final.

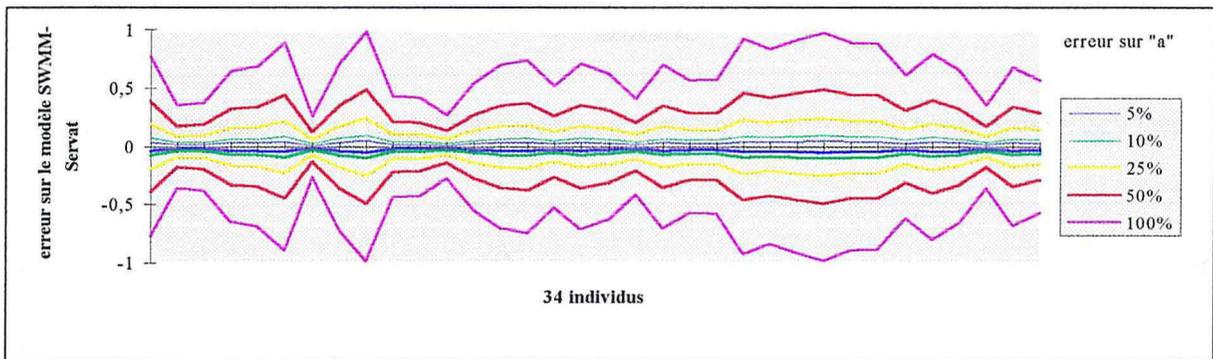


Figure V.17 : Répercussion des erreurs sur "a3" dans la prédiction des $MESTot$ par le modèle SWMM-Servat

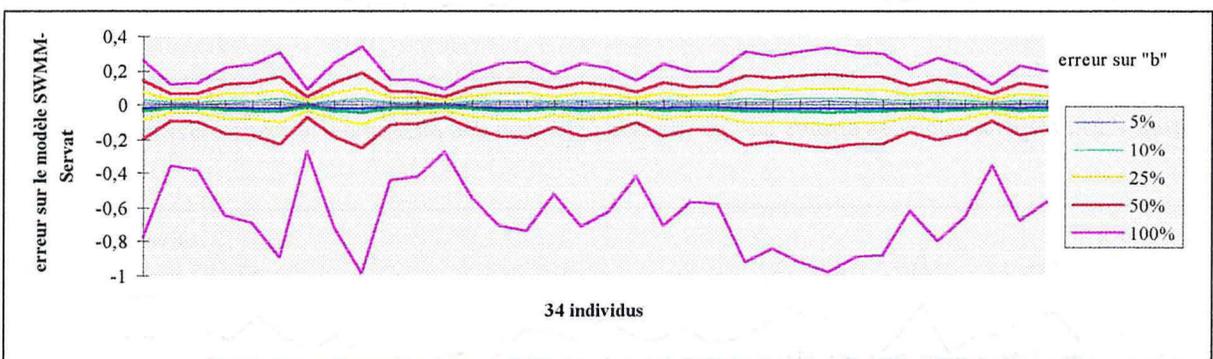


Figure V.18 : Répercussion des erreurs sur "b3" dans la prédiction des $MESTot$ par le modèle SWMM-Servat

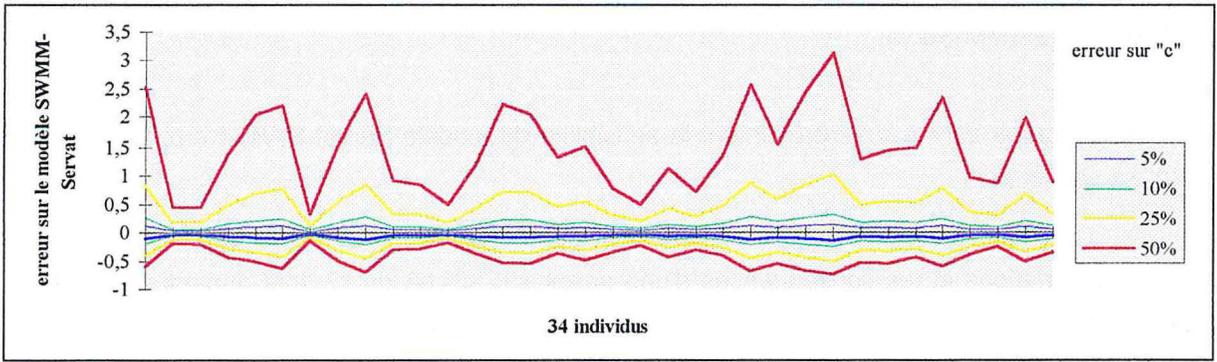


Figure V.19 : Répercussion des erreurs sur "c3" dans la prédiction des MESTot par le modèle SWMM-Servat

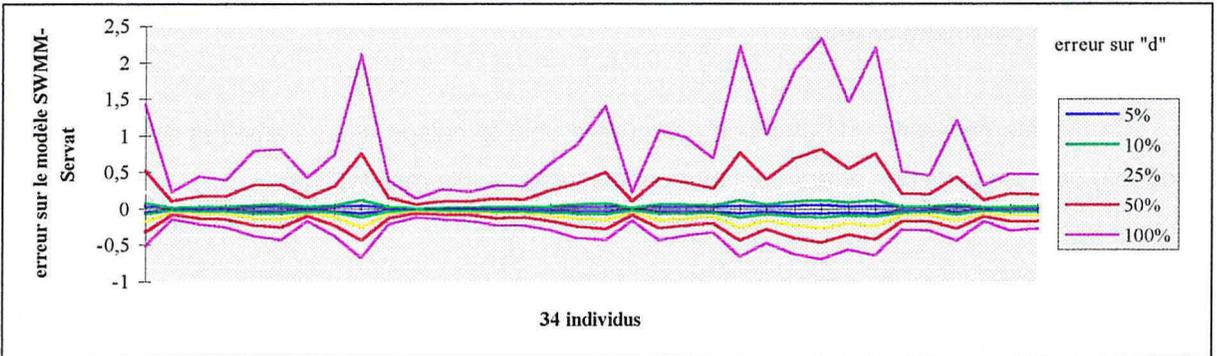


Figure V.20 : Répercussion des erreurs sur "d3" dans la prédiction des MESTot par le modèle SWMM-Servat

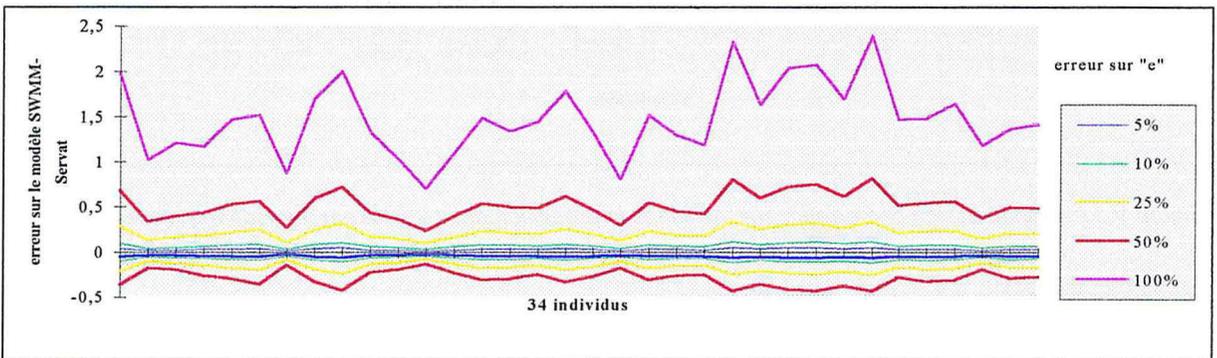


Figure V.21 : Répercussion des erreurs sur "e3" dans la prédiction des MESTot par le modèle SWMM-Servat

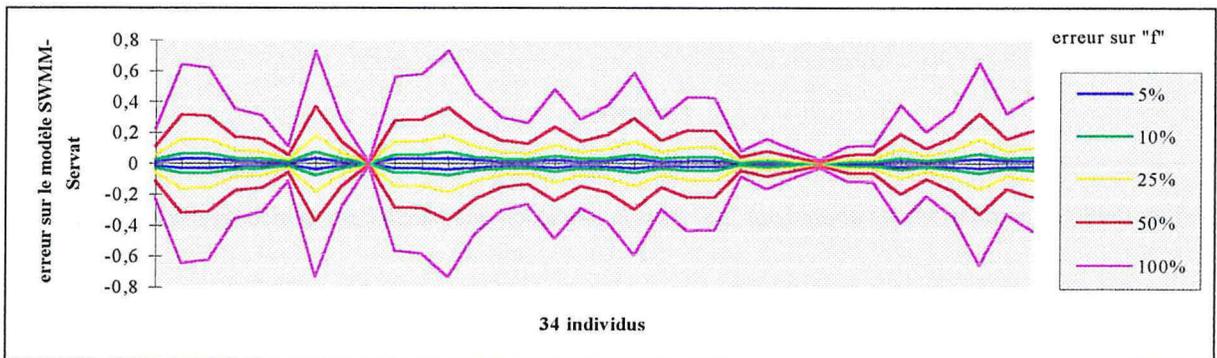


Figure V.22 : Répercussion des erreurs sur "f3" dans la prédiction des MESTot par le modèle SWMM-Servat

1.134. Modèle Servat-Servat

Les Figures V.23 à V.28 présentent la sensibilité du modèle Servat-SWMM aux paramètres a4, b4, c4, d4, e4 et f4.

a4 et f4 sont des paramètres linéaires.

b4 et c4 remplissent les mêmes conditions que b3 et c3 et d4 et e4 les mêmes que d3 et e3.

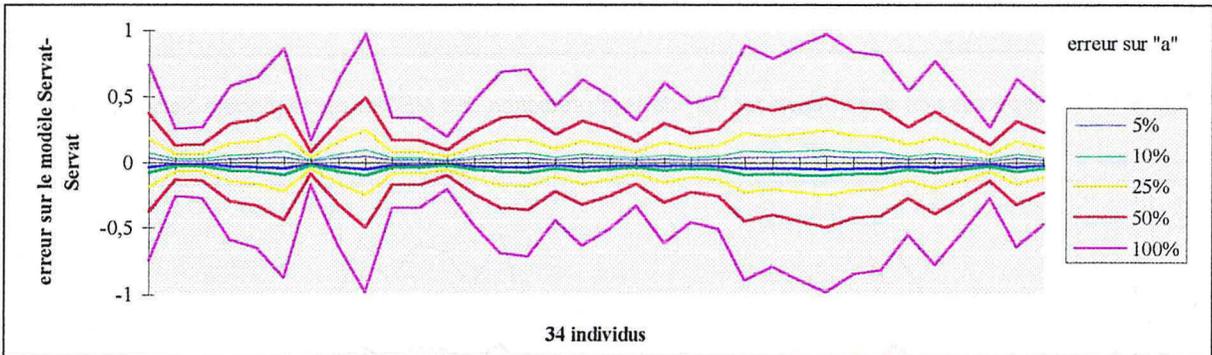


Figure V.23 : Répercussion des erreurs sur "a4" dans la prédiction des MEstot par le modèle Servat-Servat

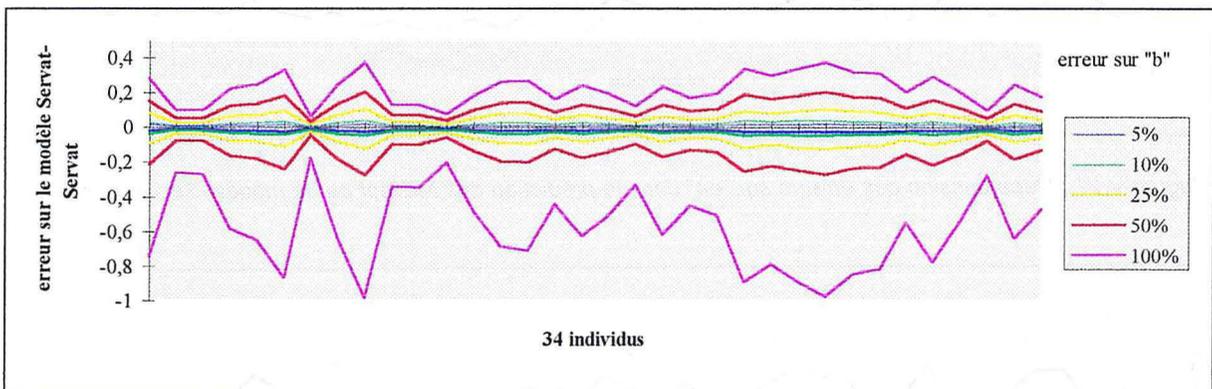


Figure V.24 : Répercussion des erreurs sur "b4" dans la prédiction des MEstot par le modèle Servat-Servat

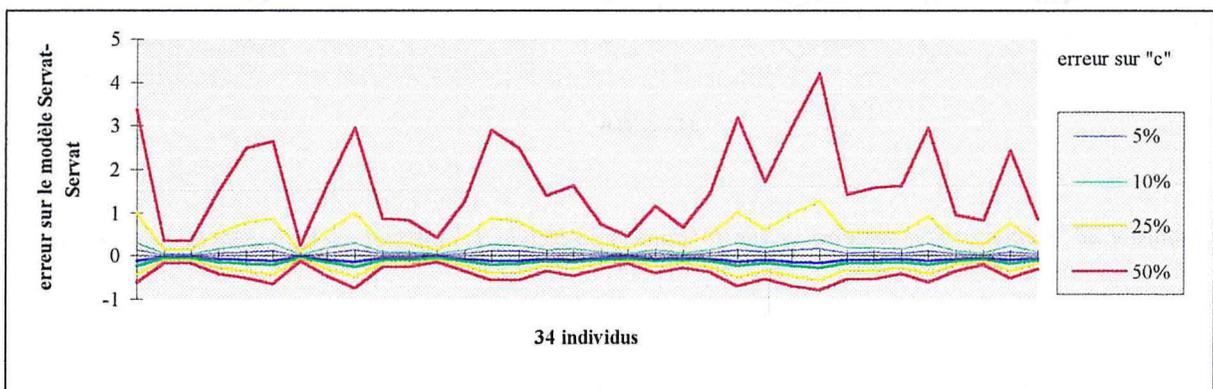


Figure V.25 : Répercussion des erreurs sur "c4" dans la prédiction des MEstot par le modèle Servat-Servat

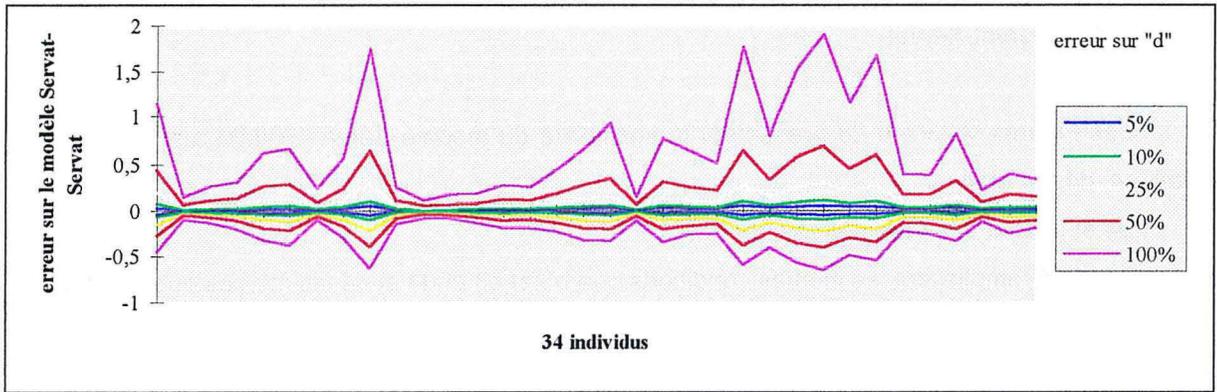


Figure V.26 : Répercussion des erreurs sur "d4" dans la prédiction des MESTot par le modèle Servat-Servat

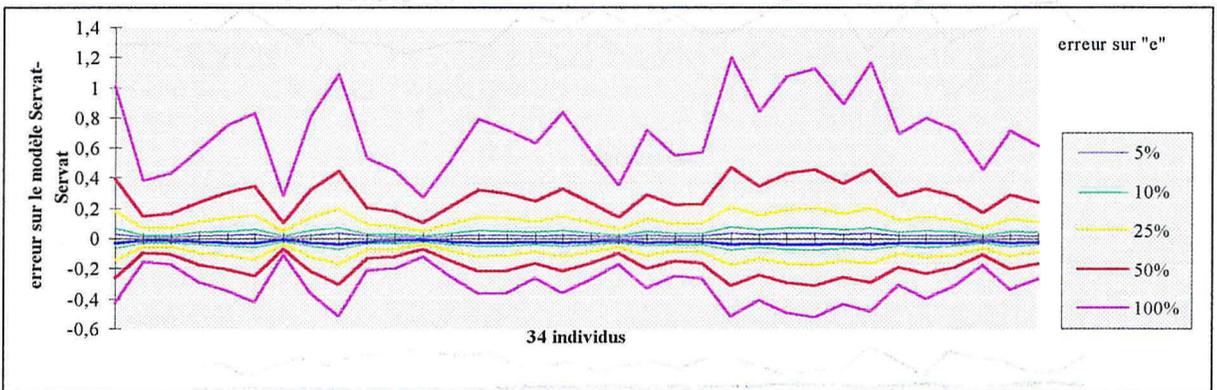


Figure V.27 : Répercussion des erreurs sur "e4" dans la prédiction des MESTot par le modèle Servat-Servat

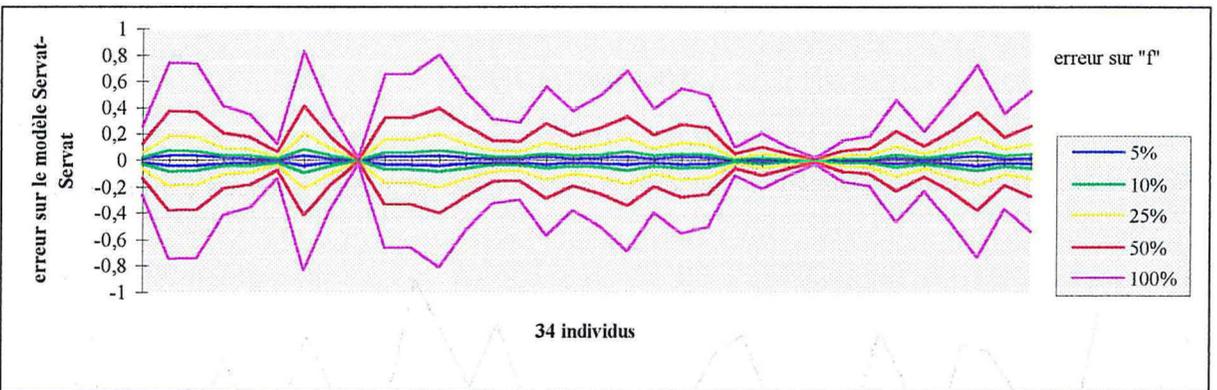


Figure V.28 : Répercussion des erreurs sur "f4" dans la prédiction des MESTot par le modèle Servat-Servat

Pour ce modèle, le calage des paramètres de puissance est très important, surtout pour c4 pour lequel une erreur de 50% peut entraîner une erreur de plus de 300% sur la prédiction de la pollution.

1.135 Conclusion de l'étude de sensibilité

L'analyse de sensibilité réalisée sur la variable MESTot, pour chacun des paramètres de chaque modèle, montre que les paramètres de puissances sont particulièrement influents, et peuvent rapidement conduire à des erreurs importantes.

On peut donc dire que les modèles de type "Servat", qu'il s'agisse de l'accumulation ou de l'arrachage, sont plus délicats à caler que ceux du type "SWMM", car ils nécessitent la détermination de ces paramètres de puissance, particulièrement sensibles et source d'erreur importante.

Cette constatation conforte le choix de privilégier le modèle SWMM-SWMM, qui de plus, de par sa simplicité, conduit nécessairement à une probabilité de combinaison d'erreurs moins importante que les trois autres modèles.

En outre, compte tenu de la précision des calculs exigée lors des itérations au moment du calage des modèles, l'erreur résultante sur la prédiction, consécutive aux erreurs de calage du modèle, devrait être négligeable, sauf si les valeurs de départ étaient trop éloignées de la vérité. Dans ce cas les itérations risquent de converger vers des valeurs de paramètres erronées. Cette éventualité ne devrait pas s'être produite, puisque nous avons pris le soin de borner les valeurs de départ.

1.2. Résultats obtenus pour les autres variables (MESmax/h, MESmax et MESmoy)

Cette seconde partie repose sur l'hypothèse que ces variables évoluent suivant les mêmes expressions mathématiques que la masse totale de MES issue d'un événement pluvieux. Compte tenu de la relative simplicité des modèles, qui sont loin de détailler l'ensemble des phénomènes, et qui sont des modèles globaux à caractère très empirique, nous avons choisi de conserver ces expressions pour les concentrations, considérant qu'il s'agit en fait d'une masse totale (MESTot) simplement divisée par un volume. C'est pour des raisons simplement d'homogénéité que nous avons ensuite choisi de conserver les mêmes modèles pour les concentrations maximales.

Après avoir indiqué l'adaptation réalisée sur les modèles, nous exposerons les résultats obtenus pour ces variables. La méthode employée est identique à celle pratiquée pour la prédiction des MESTot. Nous avons réalisé un premier calage sur l'échantillon complet de pollution, puis nous avons procédé à un ré-échantillonnage suivi d'un nouveau calage.

1.21. Adaptation des modèles aux variables

Postulant que les mécanismes de constitution de ces variables restent semblables en tout point à la formation des MESTot, les modèles que nous avons utilisés pour leur prédiction nécessitent une adaptation pour être transposés aux autres variables. L'adaptation à réaliser, dans ce cas, consiste simplement en une modification des constantes, pour tenir compte du changement d'unité. Ces changements d'unité vont s'opérer au niveau des constantes A (on considérera toujours que $A=A'$) et m des modèles (voir chapitre IV paragraphe 2.31 pour les expressions des modèles). Le Tableau V.5 indique les nouvelles valeurs des constantes selon la variable de pollution considérée, comparées aux valeurs adoptées pour les MESTot.

	MESTot kg	MESmax/h kg/h	MESmoy mg/l/j	MESmax mg/l/j
A	90	45	1500	3000
m	100	100	200	500

Tableau V.5 : Adaptation des modèles, définition des nouvelles constantes

Pour la charge horaire, la moyenne des rapports MESTot sur MESmax/h effectuée sur les 38 événements enregistrés est de 2,84. Nous avons donc donné à A la valeur de $90/2=45$. Par contre, nous avons conservé à m la valeur de 100, postulant que dans un événement au moment de la charge horaire maximale, il n'y avait pas de modification du comportement de l'apport de temps sec.

Les concentrations moyennes maximales enregistrées, issues du ruissellement sur un bassin versant urbain, sont comprises entre 1 et 4 g/l d'après Saget (1995). Ainsi pour la prédiction des MESmax, nous avons retenu pour "A" une valeur de 3000 mg/l/j et pour "m" une valeur de 500 mg/l/j, car les concentrations maximales de temps sec sont de l'ordre de 600 mg/l pour les observations réalisées sur Entzheim (Bellefleur, 1989).

La moyenne des rapports, entre les concentrations maximales divisées par les concentrations moyennes sur l'échantillon observé, s'élève à 2,33. Ainsi, nous avons retenu une valeur de $3000/2=1500$ mg/l/j pour "A" et une valeur de 200 mg/l/j pour "m", conformément aux valeurs moyennes des observations effectuées par Bertrand-Krajevski (1992), pour une concentration moyenne d'apport de temps sec.

1.22. Présentation des résultats

Le Tableau V.6 présente les résultats obtenus pour les variables MESmax/h, MESmoy et MESmax en utilisant la même méthode que pour les MESTot. Ainsi, pour les quatre modèles SWMM-SWMM, Servat-SWMM, SWMM-Servat et Servat-Servat, on trouvera pour chaque paramètre, les variations du jeu de valeur (calage des modèles sur chaque événement), le résultat du calage sur l'échantillon complet et le résultat du calage sur l'échantillon réduit.

SWMM-SWMM (1)				Servat-SWMM (2)				SWMM-Servat (3)				Servat-Servat (4)								
MES max/h																				
	variations			38 val	ech réduit	variations			38 val	ech réduit	variations			38 val	ech réduit	variations			38 val	ech réduit
	moy	max	min			moy	max	min			moy	max	min			moy	max	min		
a	1,368	4,00	0,22	0,615	0,630	1,232	2,02	0,93	4,036	0,465	0,836	1,01	0,59	2,016	2,016	0,846	1,01	0,65	2,012	2,012
b	0,228	0,50	0,11	0,625	0,625	1,124	1,62	0,97	3,229	0,482	0,948	1,00	0,88	2,007	1,379	0,910	0,99	0,84	1,211	1,574
c	1,164	3,00	0	1,003	0,970	0,762	1,41	0,44	0,545	1,179	0,239	0,30	0,15	0,219	0,379	0,274	0,36	0,16	0,189	0,451
d						0,207	0,31	0,18	0,381	0,381	0,590	0,80	0,23	1,004	0,689	0,564	0,76	0,32	0,944	0,592
e						1,624	4,80	0,23	0,598	1,130	0,215	0,41	0	0,037	0,043	0,187	0,39	0	0,067	0
f											0,968	1,51	0,25	0,774	0,793	1,066	2,02	0,24	0,695	0,849
e ²				10477	6025				9827	6054				6416	5586				6498	5476
r				0,24	0,50				0,24	0,50				0,57	0,57				0,56	0,58
R2				-0,11	0,24				-0,04	0,22				0,32	0,32				0,31	0,33
MES moy																				
	variations			38 val	ech réduit	variations			38 val	ech réduit	variations			38 val	ech réduit	variations			38 val	ech réduit
	moy	max	min			moy	max	min			moy	max	min			moy	max	min		
a	0,465	1,81	0	0,141	0,163	1,143	1,31	1,00	2,611	0,502	0,966	1,08	0,83	1,342	1,357	0,936	1,02	0,82	2,039	2,019
b	0,130	0,30	0,07	0,371	0,371	1,078	1,19	1,00	2,382	0,501	0,979	1,04	0,91	1,105	1,131	0,933	1,00	0,79	1,468	1,456
c	0,528	1,59	0,43	0,215	0,215	0,778	1,05	0,51	0,600	0,932	0,269	0,38	0,20	0,469	0,469	0,283	0,39	0,14	0,474	0,481
d						0,196	0,22	0,18	0,280	0,280	0,725	0,87	0,56	0,420	0,420	0,668	0,79	0,51	0,384	0,384
e						0,563	0,82	0,50	0,247	0,247	0,344	0,49	0,23	0,169	0,169	0,335	0,49	0,11	0,082	0,082
f											0,512	0,65	0,42	0,208	0,208	0,561	1,16	0,46	0,230	0,230
e ²				152890	92007				161178	99081				146722	128223				130812	104973
r				0,38	0,68				0,38	0,66				0,41	0,46				0,50	0,58
R2				0,02	0,41				0,02	0,37				0,11	0,18				0,21	0,33
MES max																				
	variations			38 val	ech réduit	variations			38 val	ech réduit	variations			38 val	ech réduit	variations			38 val	ech réduit
	moy	max	min			moy	max	min			moy	max	min			moy	max	min		
a	0,436	2,19	0,05	0,143	0,178	0,982	1,02	0,88	2,040	0,441	0,976	1,11	0,75	2,213	2,213	0,941	1,01	0,75	2,016	2,016
b	0,147	0,39	0,07	0,481	0,481	0,928	1,03	0,73	2,056	0,394	0,989	1,04	0,92	2,069	2,069	0,944	1,01	0,87	2,014	2,014
c	1,006	2,06	0,38	0,500	0,190	0,790	1,16	0,20	0,674	1,017	0,281	0,40	0,15	0,493	0,493	0,293	0,40	0,11	0,505	0,505
d						0,179	0,18	0,17	0,229	0,229	0,753	0,91	0,48	0,361	0,361	0,689	0,80	0,48	0,362	0,362
e						1,081	1,70	0,93	0,467	0,467	0,363	0,50	0,08	0,099	0,118	0,359	0,50	0	0,082	0,107
f											1,015	1,15	0,89	0,446	0,446	1,082	1,54	0,83	0,417	0,417
e ²				470063	242872				594727	297672				499501	377833				476971	318593
r				0,65	0,82				0,51	0,79				0,56	0,71				0,59	0,76
R2				0,34	0,67				0,19	0,59				0,30	0,48				0,33	0,57

Tableau V.6 : Détermination des bornes des paramètres pour les 4 modèles, et calage de ceux-ci sur les échantillons complets et réduits, réalisé sur MESmax/h, MES moy et MES max/h

1.221 La détermination des bornes des variables

Les variations des divers paramètres sont tout à fait analogues à celles des paramètres observés pour la détermination de MESTot (Tableau V.1).

Pour les MES max/h, l'étendue des variations est toutefois un peu plus grande, spécialement pour les paramètres a1 et e2.

Pour les MESmoy les fourchettes obtenues pour l'apport de temps sec (paramètres c1, e1, f3 et f4) sont moins étendues que pour les MESTot. Cela voudrait dire que l'apport de temps sec contribue moins dans les variations de la concentration moyenne du flux de pollution que pour la masse totale de pollution produite.

Les seules observations à relever pour les MESmax sont : une légère augmentation de la dispersion pour a1 et une légère diminution pour c1 et e2.

1.222 Le calage sur 38 valeurs

➤ Particularités liées aux MESmax/h

Les résultats du calage des modèles sur 38 valeurs, (Tableau V.6) représentés sur la Figure V.29, évalués par les diverses fonctions sont particulièrement mauvais et encourageant à abandonner à ce stade les investigations pour le calage de ces modèles sur cette variable.

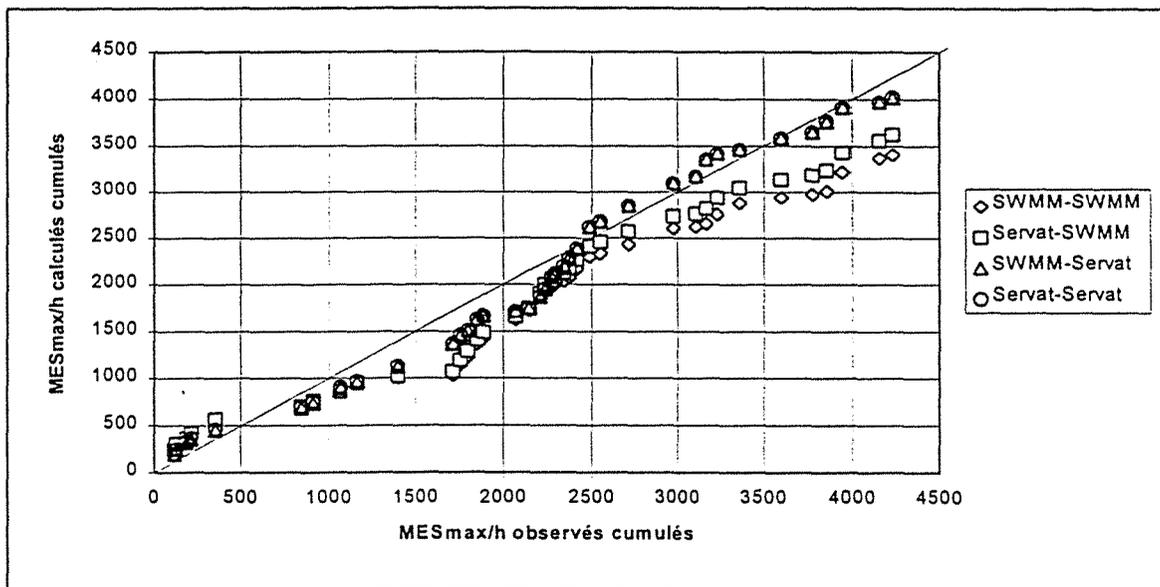


Figure V.29 : Comparaison des modèles calés pour MESmax/h sur un échantillon de 38 valeurs

Mais, comme précédemment, l'élimination de l'un ou l'autre individu suspect de l'échantillon devrait conduire à de meilleurs résultats.

➤ Particularités liées aux MES_{moy}

La Figure V.30 présente les résultats des ajustements des modèles sur l'échantillon complet de 38 valeurs.

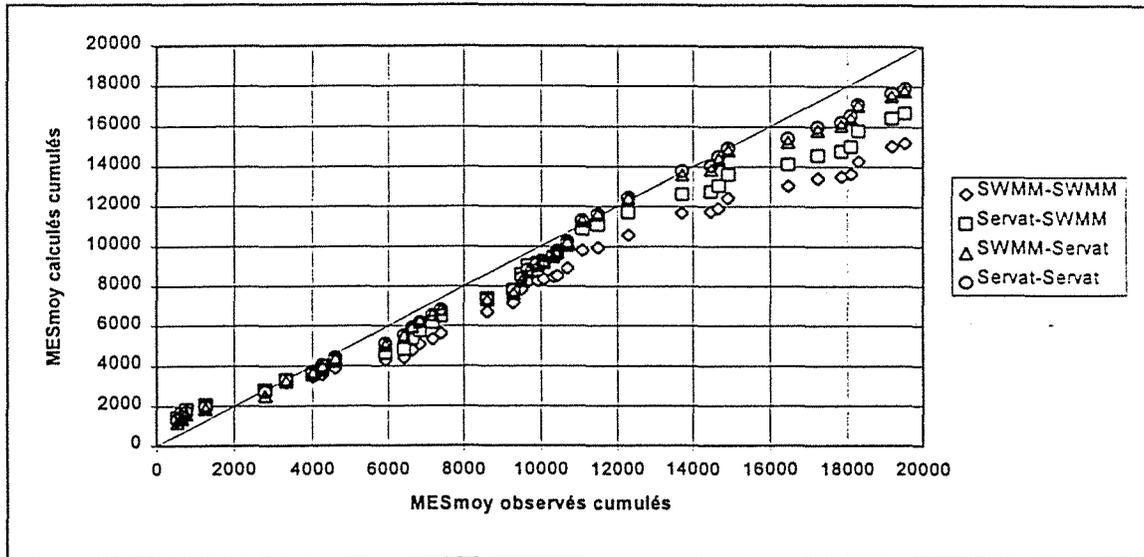


Figure V.30 : Comparaison des modèles calés pour MES_{moy} sur un échantillon de 38 valeurs

Les résultats (Tableau V.6) obtenus pour les diverses fonctions permettant l'évaluation des modèles sont trop faibles et comparables à que ceux obtenus pour les MES_{max}/h. Les conclusions sont identiques.

➤ Particularités liées aux MES_{max}

La Figure V.31 présente les résultats des ajustements des modèles sur l'échantillon complet de 38 valeurs.

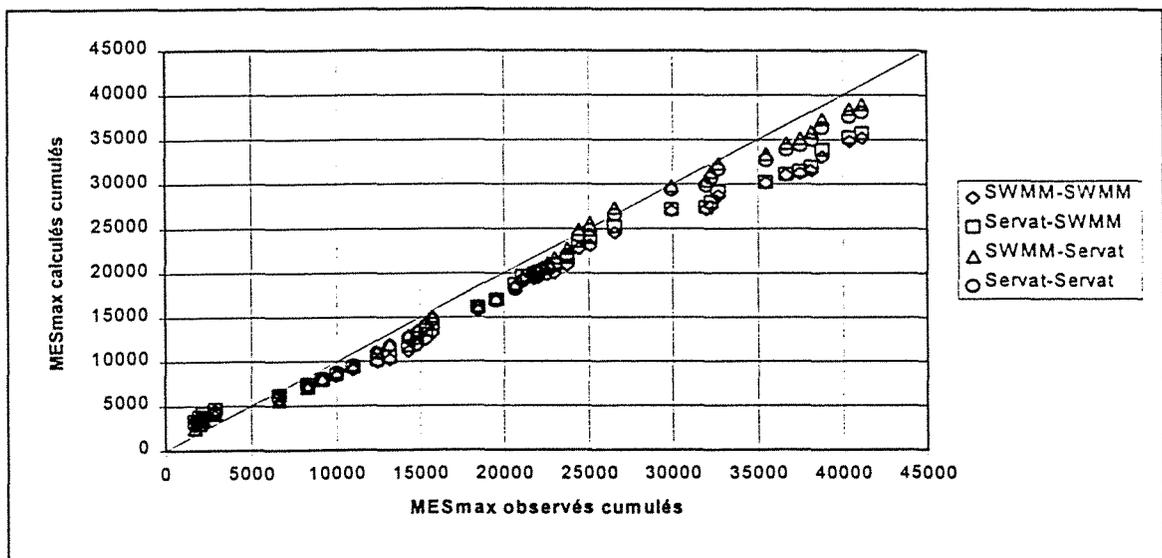


Figure V.31 : Comparaison des modèles calés pour MES_{max} sur un échantillon de 38 valeurs

Les résultats (Tableau V.6) obtenus pour les diverses fonctions permettant l'évaluation des modèles sont bien plus encourageants que ceux obtenus pour les deux variables précédemment étudiées. Ils sont légèrement inférieurs à ceux obtenus pour les MESTot.

1.223 Le "jackknife"

Comme précédemment, nous avons procédé à un ré-échantillonnage en utilisant toujours la même technique sur le modèle SWMM-SWMM.

Les résultats complets (tableaux et graphiques) des "Jackknife" sont donnés en Annexes V.4, V.6 et V.8. L'examen de ces résultats numériques et des graphiques indiquant les variations des trois fonctions utilisées pour juger le calage nous a permis de repérer les individus "suspects".

➤ Particularités liées aux MESmax/h

Comme pour les MESTot, l'examen de la somme des carrés des écarts, par rapport à la moyenne, indique une très nette diminution de cette fonction pour les individus 6, 11 et 34 et une diminution plus modérée pour les individus 33 et 36. De plus, par rapport à MESTot, on observe une diminution pour l'événement 10.

L'étude du coefficient de corrélation montre une forte augmentation pour les événements 6 et 11 et une augmentation plus modérée pour les événements 1, 34, 33, et 36 (classés dans l'ordre d'importance).

La suppression des individus 1 et 11 contribue aussi à une forte augmentation du coefficient de détermination. L'élimination des individus 29, 33, 34 et 36 y participe à moindre mesure.

Les événements 11, 33 et 34 seront exclus pour les raisons déjà évoquées. L'événement 10, précède le 11 et est, lui aussi, multiplexé. Aussi, on peut penser que la détermination du maximum horaire ait pu être faussée. Par contre, l'événement 1 ne présente aucun critère particulier.

Un nouvel échantillon a donc été constitué en éliminant les événements : 1, 10, 11, 33 et 34, et un nouveau calage des modèles a été réalisé sur 33 événements.

➤ Particularités liées aux MESmoy

L'examen de la somme des carrés des écarts, par rapport à la moyenne, indique une très nette diminution de cette fonction pour les individus 1, 10 et 32, et une diminution plus modérée pour les individus 5 et 29.

L'étude du coefficient de corrélation montre une forte augmentation pour l'événement 1 et une augmentation plus modérée pour les événements 10, 18, 25, et 29 que l'on retrouve de façon identique dans les variations du coefficient de détermination.

Les événements qui causent les principaux troubles sont donc les événements 1 et 10, que nous avons déjà rencontrés pour les autres variables, ainsi que l'événement 29.

Sur l'événement 29, les difficultés résident dans la détermination de l'instant précis de fin de ruissellement. Il est donc possible que la valeur adoptée ne soit pas tout à fait exacte. Mais, si cette valeur avait été totalement erronée, nous aurions déjà trouvé des difficultés pour cet individu sur les autres variables (MES_{tot} et MES_{max/h}). Dans le cas présent, comme il s'agit d'une valeur relativement importante (voir Tableau II.2), pour un événement de courte durée avec une intensité maximale légèrement supérieure à la moyenne, on peut penser qu'il y a eu remise en suspension des dépôts stockés dans le réseau.

Le nouvel échantillon a donc été constitué en éliminant les événements : 1, 10, et 29, et un nouveau calage des modèles a été réalisé avec 35 événements.

> Particularités liées aux MES_{max}

L'examen de la somme des carrés des écarts, par rapport à la moyenne, indique une très nette diminution de cette fonction pour les individus 1, 5 et 29 et une diminution plus modérée pour les individus 25 et 32.

L'étude du coefficient de corrélation montre une forte augmentation pour les événements 1, 25 et 29 que l'on retrouve de façon identique dans les variations du coefficient de détermination.

Pour les événements 1 et 25, compte tenu des techniques d'échantillonnage, il est probable que nous n'ayons pas enregistré la valeur maximum instantanée réelle.

L'erreur commise sur l'individu 29 est probablement liée à la remise en suspension de dépôts stockés dans le réseau, comme nous l'avons déjà évoqué pour les concentrations moyennes.

Le nouvel échantillon a donc été constitué en éliminant les événements 1, 25 et 29, et un nouveau calage des modèles a été réalisé sur 35 événements.

1.224 Le calage sur un échantillon réduit

Nous avons donc procédé à un ré-échantillonnage (en utilisant toujours la même technique que pour l'évaluation des MES_{tot}) sur le modèle SWMM-SWMM.

> Particularités liées aux MES_{max/h}

Comparées aux résultats obtenus avec l'échantillon complet de pollution, les valeurs des paramètres de calage sont très voisines. Seules les valeurs c2 et c4 présentent une augmentation très importante de 116 et 138% qui entraîne, de ce fait, des modifications sur les paramètres a2 et b2 d'une part et b4 d'autre part (a4 est en limite supérieure de domaine).

On notera les faibles valeurs des paramètres e3 et e4 qui indiqueraient que la charge horaire ne varie pas avec la hauteur totale de pluie tombée dans le modèle d'arrachage de type "Servat".

Considérant les fonctions somme des carrés des écarts, coefficient de corrélation et coefficient de détermination, les valeurs sont stationnaires pour les modèles SWMM-Servat et

Servat-Servat, mais convenablement améliorées pour les modèles SWMM-SWMM et Servat-SWMM.

Les 4 modèles présentent une adéquation similaire mais les coefficients de corrélation et de détermination restent encore trop peu élevés.

Les Figures V.32, V.33, V.34 et V.35 permettent la comparaison des modèles calés sur le nouvel échantillon avec ceux obtenus sur l'échantillon complet.

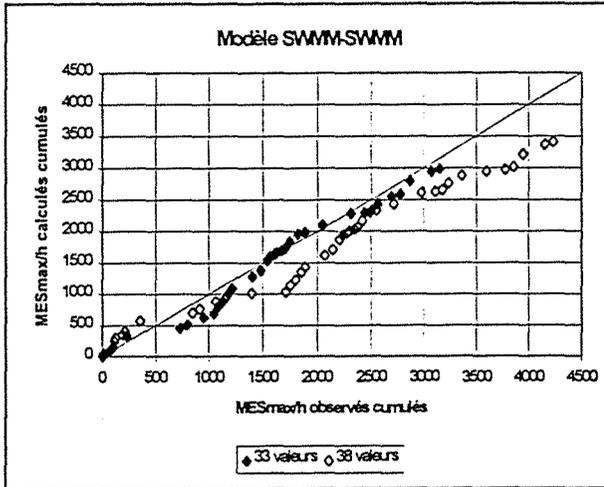


Figure V.32 : Modèle SWMM-SWMM calé sur un échantillon de MESmax/h réduit

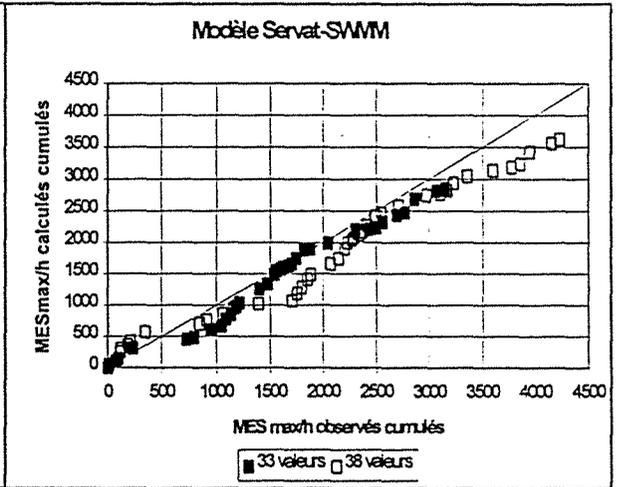


Figure V.33 : Modèle Servat-SWMM calé sur un échantillon de MESmax/h réduit

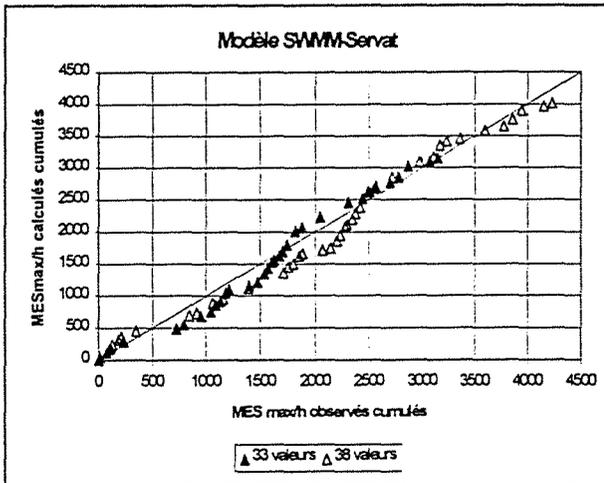


Figure V.34 : Modèle SWMM-Servat calé sur un échantillon de MESmax/h réduit

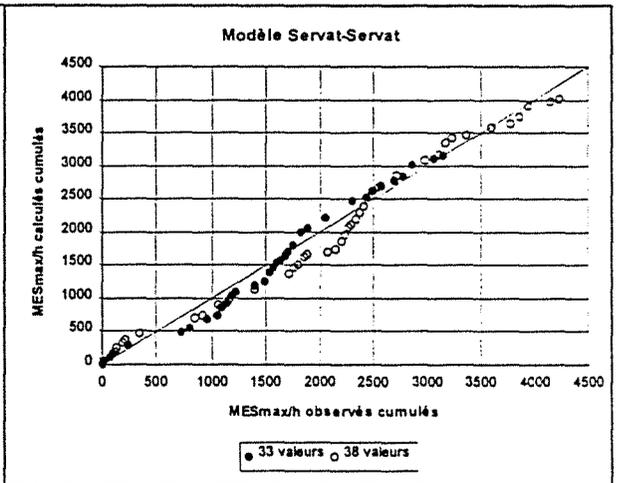


Figure V.35 : Modèle Servat-Servat calé sur un échantillon de MESmax/h réduit

L'amélioration est très sensible pour les modèles SWMM-SWMM et Servat-SWMM qui se rapprochent de la première bissectrice, bien qu'ils sous-estiment toujours globalement les valeurs de MESmax/h.

L'erreur supplémentaire commise sur les cinq valeurs exclues de l'ajustement est résumée dans le Tableau V.7. On constate un maximum de 96% d'erreur supplémentaire commise sur l'événement 1. La moyenne de l'erreur résultante sur les cinq individus, tous modèles confondus, est de 16%.

MESmax/h	=116			1 =235			1=317			3=237			3 =179		
	e su	38	33	e su	38	33	e su	38	33	e su	38	33	e su	38	33
SWMM-SWMM	3,4	252,1	256,1	-0,7	66,4	68,0	-0,1	20,5	20,7	-0,4	64,7	65,7	0,1	28,6	28,4
Servat-SWMM	96,3	247,1	358,8	13,1	78,1	47,4	9,1	43,2	14,4	15,2	86,1	50,2	12,7	47,4	24,6
SWMM-Servat	14,9	194,1	211,4	9,9	164,6	141,4	34,8	241,0	130,7	5,6	128,5	115,3	4,0	61,1	54,0
Servat-Servat	35,8	200,7	242,2	10,3	157,4	133,1	44,4	237,0	96,2	9,2	128,0	106,2	9,4	64,4	47,7

emoyen= 16,4

emax= 96,3

Tableau V.7 : Erreur supplémentaire de prédiction sur les cinq individus exclus de l'échantillon

➤ Particularités liées aux MESmoy

Comparées aux résultats obtenus avec l'échantillon complet de pollution, les valeurs des paramètres de calage sont presque identiques. Seule la valeur de c2 présente une augmentation importante de 55% qui entraîne, des modifications sur les paramètres a2 et b2.

Considérant les fonctions somme des carrés des écarts, coefficient de corrélation et coefficient de détermination, les valeurs sont peu améliorées pour les modèles SWMM-Servat et Servat-Servat, mais en nette augmentation pour les modèles SWMM-SWMM et Servat-SWMM.

Ces deux derniers modèles présentent une adéquation similaire mais les coefficients de corrélation et de détermination restent encore trop faibles. Les modèles d'arrachage de type "Servat" restent totalement insuffisants.

Les Figures V.36, V.37, V.38 et V.39 permettent la comparaison des modèles calés sur le nouvel échantillon avec ceux obtenus sur l'échantillon complet.

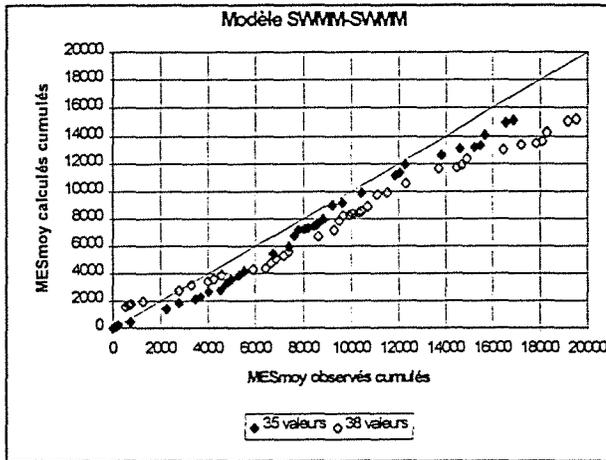


Figure V.36 : Modèle SWMM-SWMM calé sur un échantillon de MESmoy réduit

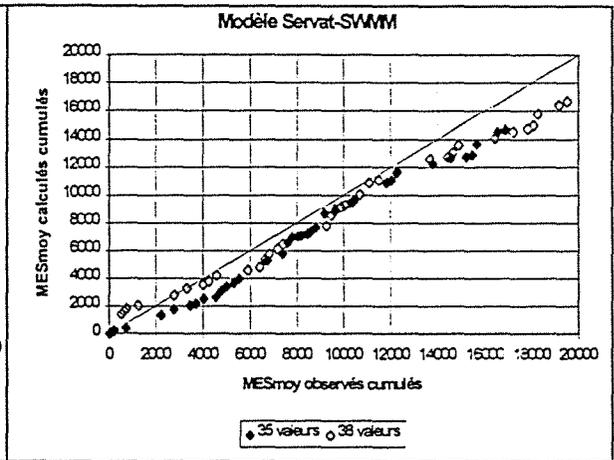


Figure V.37 : Modèle Servat-SWMM calé sur un échantillon de MESmoy réduit

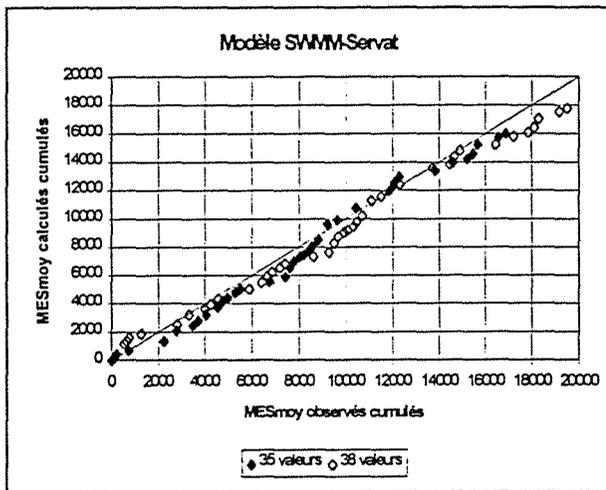


Figure V.38 : Modèle SWMM-Servat calé sur un échantillon de MESmoy réduit

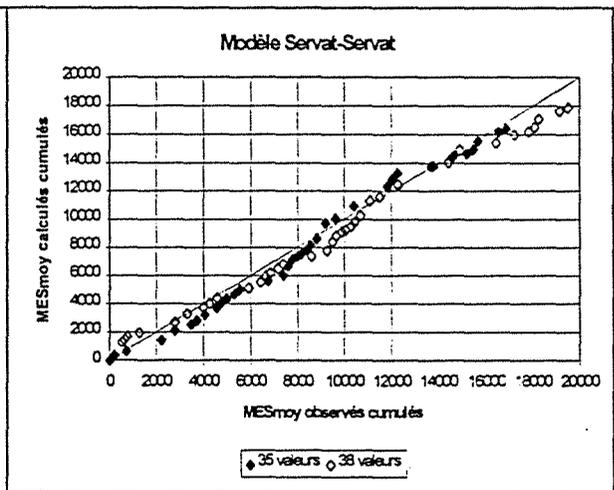


Figure V.39 : Modèle Servat-Servat calé sur un échantillon de MESmoy réduit

L'amélioration est très sensible pour les modèles SWMM-SWMM et Servat-SWMM qui se rapprochent de la première bissectrice, bien que comme pour les autres variables, ils sous-estiment toujours globalement les valeurs de MESmoy.

L'erreur supplémentaire commise sur les trois valeurs exclues de l'ajustement est résumée dans le Tableau V.8. La moyenne de l'erreur résultante sur les trois individus, tous modèles confondus, est de 10%, alors que l'erreur maximale commise pour le modèle Servat-SWMM est de 144%.

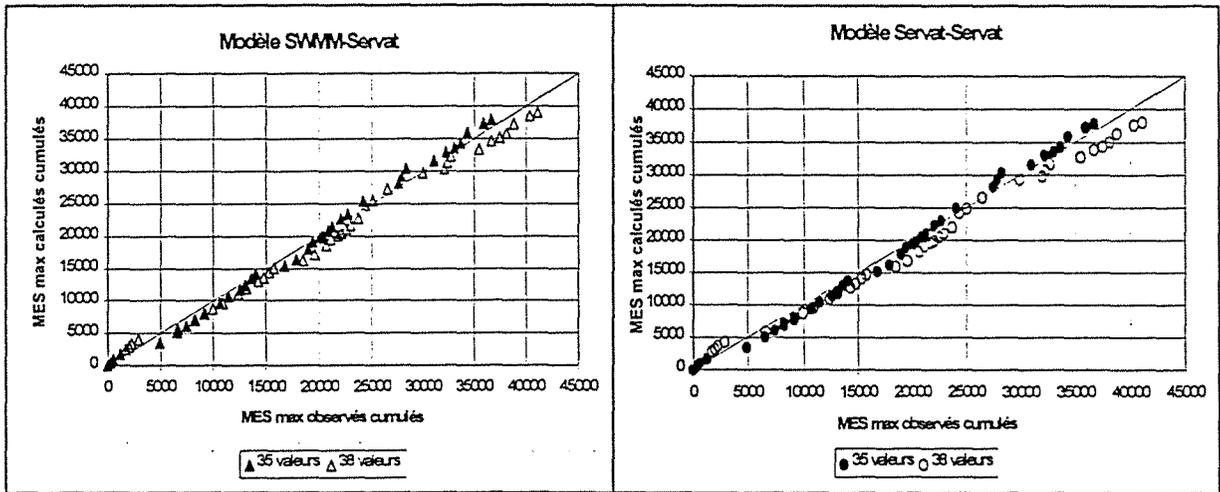


Figure V.42 : Modèle SWMM-Servat calé sur un échantillon de MESmax réduit

Figure V.43 : Modèle Servat-Servat calé sur un échantillon de MESmax réduit

Les quatre modèles sont bien ajustés et suivent convenablement la première bissectrice.

Comme précédemment, les modèles SWMM-SWMM et Servat-SWMM ont tendance à sous-estimer les valeurs à prédire, ce qui n'est pas le cas des modèles SWMM-Servat et Servat-Servat.

L'erreur supplémentaire commise sur les trois valeurs exclues de l'ajustement est résumée dans le Tableau V.9. La moyenne de l'erreur résultante sur les trois individus, tout modèle confondu, est importante et s'élève à 40% pour un maximum de 142%, sur le modèle Servat-SWMM, toujours pour l'événement 1.

MESmax	1=1715			25=688			29=2060		
	e sup	38	35	e sup	38	35	e sup	38	35
SWMM-SWMM	43,3	3352,0	4095,3	63,6	1871,0	2308,6	-1,6	170,3	203,8
Servat-SWMM	142,6	3333,7	5778,7	89,5	1883,9	2499,4	4,0	217,8	136,1
SWMM-Servat	20,0	2505,8	2849,5	44,2	2181,1	2485,5	-3,1	551,5	615,5
Servat-Servat	30,1	2832,4	3348,4	58,5	2183,7	2586,2	-3,7	499,3	575,5

emoyen 40,6

emax 142,6

Tableau V.9 : Erreur supplémentaire de prédiction sur les cinq individus exclus de l'échantillon

1.3. Synthèse des expressions mathématiques obtenues

Après avoir remplacé les paramètres par leurs valeurs obtenues sur le calage des échantillons réduits, les expressions mathématiques résultantes figurent dans le Tableau V.10 et sont comparées aux régressions linéaires obtenues sur le même échantillon.

Modèles	Fonction	r	R2
MES_{tot}			
SWMM-SWMM	$= 548 (1-e^{-0,08 TS}) (1-e^{-0,52 H_{tot}}) + 413 \text{ Durée}$	0,72	0,51
Servat-SWMM	$= 0,95 (87 TS)^{0,87} (1-e^{-0,36 H_{tot}}) + 414 \text{ Durée}$	0,71	0,49
SWMM-Servat	$= 2,2 (2387 (1-e^{-0,08 * TS}))^{0,36} I_5^{0,39} (160 H_{tot})^{0,19} + 250 \text{ Durée}$	0,71	0,48
Servat-Servat	$= 1,7 (114 TS)^{0,47} I_5^{0,38} (160 H_{tot})^{0,12} + 363 \text{ Durée}$	0,73	0,53
Régression linéaire	$= 19,9 I_{moy} + 336,7 \text{ Durée} + 26,0 TS + 0,1$	0,81	0,65
MES_{max/h}			
SWMM-SWMM	$= 368 (1-e^{-0,08 TS}) (1-e^{-0,63 H_{tot}}) + 100 \text{ Durée}$	0,50	0,24
Servat-SWMM	$= 0,5 (21,7 TS)^{1,18} (1-e^{-0,38 H_{tot}}) + 113 \text{ Durée}$	0,50	0,22
SWMM-Servat	$= 2,0 (807 (1-e^{-0,08 TS}))^{0,38} I_5^{0,69} * (160 H_{tot})^{0,04} + 79 \text{ Durée}$	0,57	0,32
Servat-Servat	$= 2,0 (71 TS)^{0,45} I_5^{0,59} + 85 \text{ Durée}$	0,58	0,33
Régression linéaire	$= 5,5 I_5 + 102,3 \text{ Durée} + 16,4 TS - 36,3$	0,65	0,43
MES_{moy}			
SWMM-SWMM	$= 3178 (1-e^{-0,08 TS}) (1-e^{-0,37 H_{tot}}) + 43 \text{ Durée}$	0,68	0,41
Servat-SWMM	$= 0,5 (752 TS)^{0,93} (1-e^{-0,28 H_{tot}}) + 49 \text{ Durée}$	0,66	0,37
SWMM-Servat	$= 1,4 (1697 (1-e^{-0,08 TS}))^{0,47} I_5^{0,42} * (160 H_{tot})^{0,17} + 42 \text{ Durée}$	0,46	0,18
Servat-Servat	$= 2,0 (2184 TS)^{0,48} * I_5^{0,38} * (160 H_{tot})^{0,08} + 46 \text{ Durée}$	0,58	0,33
Régression linéaire	$= 122,0 TS + 151,3$	0,82	0,67
MES_{max}			
SWMM-SWMM	$= 6942 (1-e^{-0,08 TS}) (1-e^{-0,48 H_{tot}}) + 250 \text{ Durée}$	0,82	0,67
Servat-SWMM	$= 0,4 (1182 TS)^{1,02} (1-e^{-0,23 H_{tot}}) + 233 \text{ Durée}$	0,79	0,59
SWMM-Servat	$= 2,2 (80691 (1-e^{-0,08 * TS}))^{0,49} I_5^{0,36} (160 H_{tot})^{0,12} + 223 \text{ Durée}$	0,71	0,48
Servat-Servat	$= 2,0 (6042 TS)^{0,51} I_5^{0,36} (160 H_{tot})^{0,11} + 208 \text{ Durée}$	0,76	0,57
Régression linéaire	$= 14,5 I_5 + 287,2 TS + 92,1$	0,87	0,76

Tableau V.10 : Expression mathématique des modèles obtenus selon la variable considérée

L'examen des coefficients de corrélation et de détermination obtenus, quelle que soit la variable considéré, et quel que soit le modèle global étudié, conduisent à des résultats semblables ou légèrement moins bons que ceux obtenus par les régressions linéaires.

1.4. Conclusions relatives au calage des modèles

D'une façon générale, on peut constater que les modèles constitués par un arrachage de type "SWMM" ont globalement une tendance à sous-estimer les variables à prédire.

Malgré l'étude critique préalable des événements de pollution, il faut admettre que certains individus de l'échantillon de 38 valeurs posent des problèmes, du fait de leur comportement hétérogène dans le calage des modèles. Ces individus, qualifiés de "suspects", peuvent l'être à deux titres : soit parce qu'ils présentent des erreurs d'estimation, ou de mesure, qui sont passées inaperçues lors de la critique des données, soit parce qu'ils résultent de conditions de formation différentes de celles prise en compte par les modèles. La remise en suspension des dépôts en est un exemple.

➤ *Prédiction des MES_{tot}*

En considérant la masse totale de MES, les résultats obtenus pour le calage des modèles sur l'échantillon de 38 valeurs de pollution sont semblables d'un modèle à l'autre. Les coefficients de corrélation et de détermination sont assez faibles.

Les résultats, issus du calage sur l'échantillon réduit (34 valeurs) obtenus par une technique voisine du "jackknife", sont nettement améliorés et sont jugés convenables compte tenu de la complexité du phénomène modélisé.

Les écarts obtenus entre la régression linéaire et le modèle "SWMM-SWMM" sur les coefficients de corrélation et de détermination sont de 0,07 et 0,13.

L'erreur supplémentaire commise, si l'on emploie les modèles calés sur l'échantillon réduit, sur la prédiction des événements qui ont été écartés lors du ré-échantillonnage, n'est pas significative, en regard de l'erreur initialement commise par l'utilisation des modèles de prédiction calés sur 38 valeurs. L'exclusion de ces valeurs est donc possible.

On peut donc conclure que les modèles prédisent correctement la masse totale de pollution produite après une pluie sur un bassin versant urbanisé.

➤ *Prédiction des autres variables*

L'examen des résultats obtenus, pour les charges horaires (MES_{max}/h) par transposition et calage des modèles établis pour la détermination de la masse totale de pollution résultant d'un

événement pluvieux (MESTot), est médiocre, tant sur l'échantillon complet de pollution que sur les échantillons réduits.

Il faut convenir que les modèles aussi simplement transposés ne sont probablement pas très bien adaptés à la prédiction de ces variables.

La comparaison des régressions linéaires obtenues pour les MESmoy et les modèles tend à montrer qu'une amélioration devrait pouvoir être obtenue par d'autres adaptations sur les modèles. Par contre cette même comparaison réalisée pour les MESmax/h semble indiquer qu'une amélioration des modèles reste hypothétique.

A défaut de disposer d'autres modèles plus précis, les résultats obtenus après ré-échantillonnage pourraient servir à la prédiction des MESmax/h et des MESmoy, permettant ainsi d'obtenir des valeurs approximatives de la charge horaire et de la concentration moyenne de la pollution résultant d'un événement pluvieux.

Mais il faut rester très prudent quant à l'usage qui en sera fait, compte-tenu de l'approximation avec laquelle elles ont été déterminées.

Concernant les concentrations maximales (MESmax), les modèles semblent convenir après transposition. Les résultats du calage des modèles sur l'échantillon complet sont semblables à ceux obtenus pour les MESTot, et ceux obtenus à partir de l'échantillon réduit sont bien meilleurs. L'adaptation des modèles, réalisée pour cette variable convient bien, d'autant mieux que les écarts entre les coefficients r et R^2 , relatifs au SWMM-SWMM et à la regression linéaire, ne sont que de 0,05 et 0,09.

2. Caractérisation de la pollution

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons calé les différents modèles de production de pollution, d'abord sur l'échantillon de 38 individus puis sur un échantillon réduit de quelques uns d'entre-eux. Nous allons nous servir de ces modèles pour calculer la pollution résultante, à partir d'une série d'événements de pluviométrie suffisamment exhaustive. Nous pourrons ensuite ajuster sur cet échantillon de pollution "généralisé" une courbe de fréquence théorique. Cette courbe nous permettra d'obtenir les périodes de retour de différents événements.

Pour arriver au résultat recherché, il nous faudra donc réaliser trois étapes :

- bâtir un générateur et définir un échantillon de pollution,
- ajuster une loi statistique sur l'échantillon de pollution obtenu,
- déterminer les périodes de retour.

Une étape supplémentaire consistera à voir, s'il n'existe pas de relation simple, entre les fréquences de la pollution et celles obtenues pour un couple "Temps-Sec/Pluie", ou pour des combinaisons de fréquences des données de pluviométrie.

Nous présenterons les résultats détaillés obtenus sur les MES_{tot}, pour lesquels les modèles ont été élaborés, ainsi que les résultats issus de la transposition des modèles aux variables MES_{smoy} et MES_{max}. Compte tenu des faibles résultats obtenus pour le calage des modèles sur les MES_{max/h} nous ne poursuivront pas la démarche de détermination des fréquences sur cette variable.

2.1. Mise en place d'un générateur de pollution

Ne disposant sur le site d'Entzheim que de 10,25 années de pluviométrie sur lesquelles calculer la pollution, nous avons décidé d'augmenter cet échantillon par la constitution d'un "générateur de pluie", à concurrence de 50 années, afin de disposer d'un échantillon suffisamment exhaustif pour effectuer une bonne étude statistique.

Disposant des équations des modèles obtenues dans la première partie de ce chapitre (Tableau V.10), et ayant établi les lois marginales suivies pour chaque variable de pluie et de temps sec dans le Chapitre III (Tableau III.3), il a été possible de construire un générateur de pollution. En effet en tirant au hasard des fréquences, il a été possible de constituer un événement pluvieux, puis de calculer la pollution correspondante au moyen des différents modèles. Si l'on répète cette opération à raison de $991 / 10,25 = 96$ à 97 événements par an, on peut alors construire quelques 50 années de mesures de pluviométrie et calculer la pollution correspondante. Une condition supplémentaire s'impose, il s'agit de prendre en compte la saisonnalisation des précipitations que nous avons

supplémentaire s'impose, il s'agit de prendre en compte la saisonnalisation des précipitations que nous avons observée, en tirant proportionnellement à l'échantillon observé un nombre d'événement d'hiver et un nombre d'événement d'été, on constitue alors un échantillon de 4830 événements (les détails de la constitution du générateur figurent en Annexe V.9).

On notera que pour la pollution aucun "bruit" n'a été introduit tendant à reconstituer l'imperfection du modèle, on sous-estime de ce fait légèrement la variance de la production de pollution. Mais, cette omission est de faible conséquence, pour l'estimation ultérieure des périodes de retour de la pollution qui nous intéressent.

Après classement des valeurs générées, les courbes des Figures V.44, V.45 et V.46 ont été obtenues.

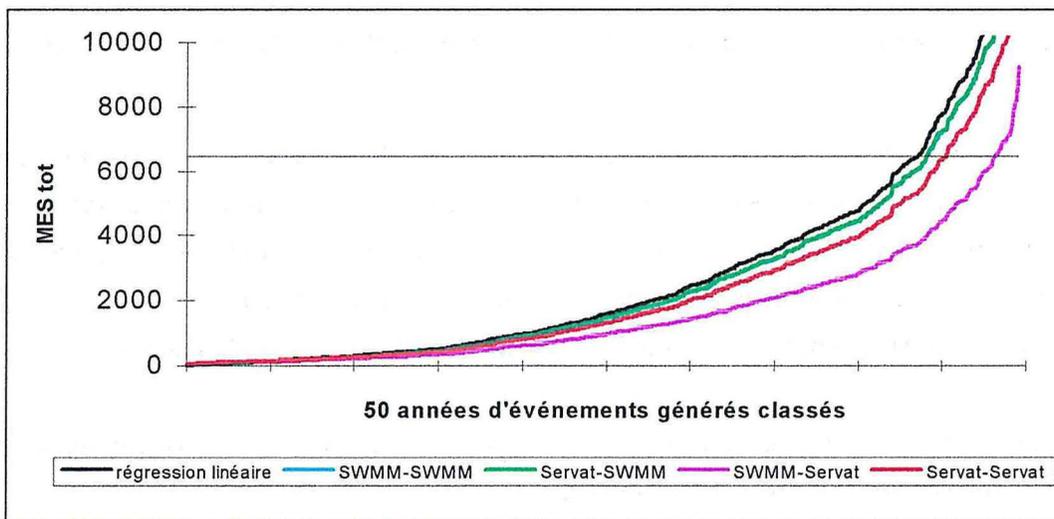


Figure V.44 : Génération de 50 années d'observations de MES_{tot} selon les divers modèles

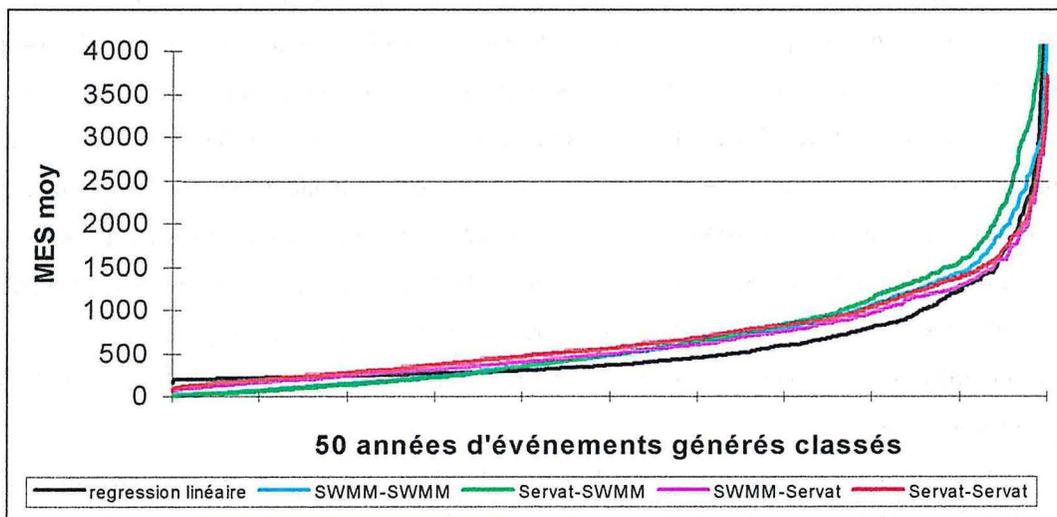


Figure V.45 : Génération de 50 années d'observations de MES_{moy} selon les divers modèles

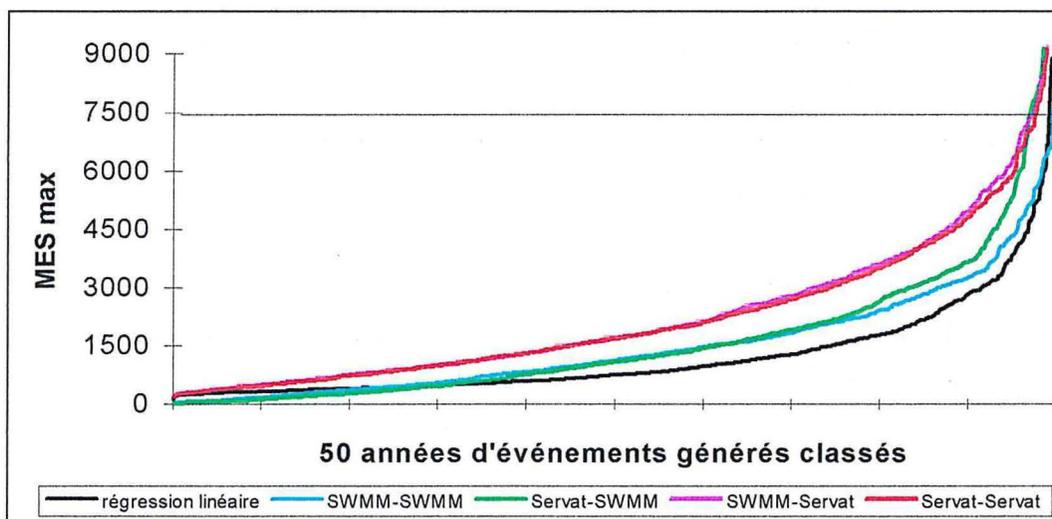


Figure V.46 : Génération de 50 années d'observations de MESmax selon les divers modèles

Ces courbes indiquent toutes des valeurs extrêmes à tendance exponentielle. Dans la réalité, la quantité de matière en suspension qu'un événement pluvieux peut déplacer est limitée par une valeur maximale. Il a donc été nécessaire d'introduire une **notion de seuil**, lié aux potentialités intrinsèques du bassin versant d'Entzheim, que les différents modèles n'intègrent pas. La détermination des seuils retenus pour les quatre variables a été expliquée au Chapitre IV § 2.7.

L'observation des courbes tracées pour les quatre modèles globaux et la régression linéaire indique une bonne cohérence des modèles entre-eux.

Pour les MES_{tot}, les modèles SWMM-SWMM et Servat-SWMM sont confondus et très proches des valeurs obtenues par la régression linéaire. Le modèle SWMM-Servat est légèrement inférieur aux deux autres. Seul le modèle SWMM-Servat semble sous-estimer la pollution pour des valeurs supérieures à 1000 kg. Cette différence provient du fait que le paramètre "f3" du modèle, servant de coefficient de modulation de l'apport de temps sec, est en limite supérieure du domaine.

Pour les MES_{moy}, les modèles suivent des progressions différentes mais sont néanmoins très voisins les uns des autres. L'écart maximum est cette fois plus important et est de l'ordre de 500mg/l sur les valeurs moyennes (jusqu'au rang 4500; au delà l'écart devient égal à 1g/l).

Pour les MES_{max}, les courbes sont plus dispersées et l'écart est plus important selon l'usage de l'un ou l'autre modèle.

On retrouve à chaque fois, la prédominance du modèle d'arrachage par rapport au modèle d'accumulation. En effet, les modèles globaux utilisant le même modèle d'arrachage présentent des variations identiques, quelle que soit la variable considérée.

A l'aide de ces courbes il est donc possible de définir des lois de fréquence pour chaque variable (à défaut, on aurait également pu donner un encadrement de cette loi.). A cet effet, on

le modèle SWMM-SWMM qui présente généralement le coefficient de corrélation le plus élevé et dont le degré de liberté est le moins élevé.

2.2. Ajustement de lois

Sur l'échantillon de MESTot obtenu en utilisant le générateur de pluie et le modèle SWMM-SWMM, nous avons cherché à ajuster une loi statistique. Le meilleur résultat obtenu l'a été pour une loi de Weibull. La Figure V.47 présente cet ajustement sur la portion d'événements qui nous intéressent particulièrement, c'est-à-dire celle concernant les événements courants situés en dessous du seuil limite de production du bassin versant.

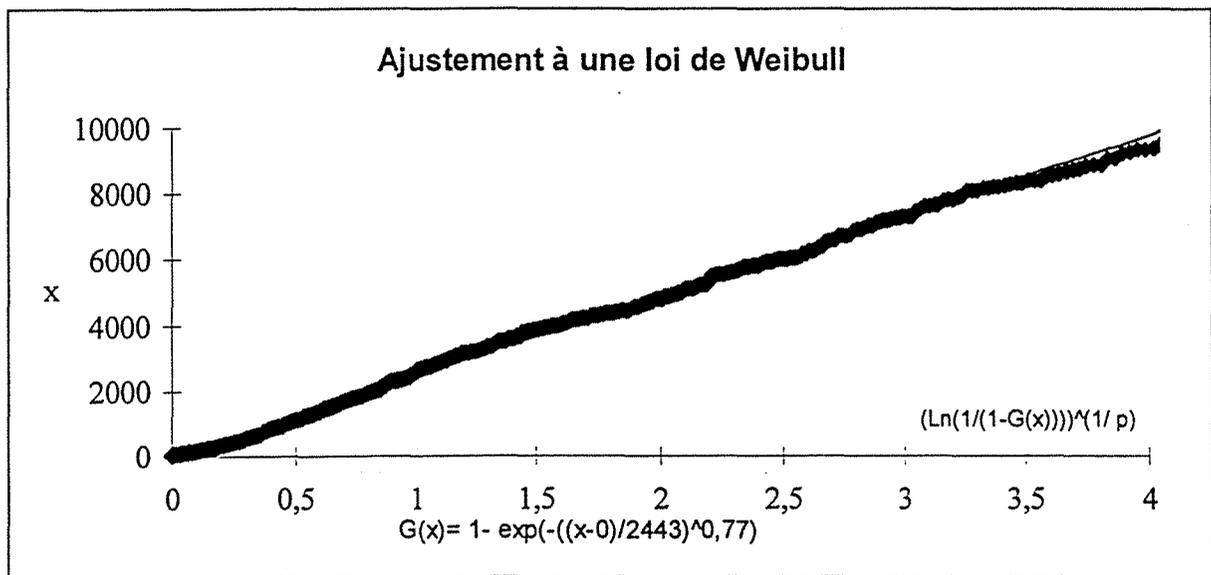


Figure V.47 : Ajustement à une loi de Weibull de l'échantillon de MESTot généré

L'équation de la loi de fréquence est alors :

$$G(x) = 1 - e^{\left(-\left(\frac{x-0}{2443}\right)^{0,77}\right)} \quad \text{avec } M=56 \text{ et } M_1=61$$

De la même façon, on a obtenu :

$$\text{- Pour MESmoy} \Rightarrow G(x) = 1 - e^{\left(-\left(\frac{x-7}{650}\right)^{1,01}\right)} \quad \text{avec } M=56 \text{ et } M_1=62$$

$$\text{- Pour MESmax} \Rightarrow G(x) = 1 - e^{\left(-\left(\frac{x-19}{1520}\right)^{1,05}\right)} \quad \text{avec } M=56 \text{ et } M_1=109$$

2.3 Détermination de la période de retour

L'établissement des lois précédentes nous permet donc d'approcher les périodes de retour T d'une valeur déterminée de la pollution, correspondant à un événement de pluviométrie assez courant, en utilisant la formule :

$$T = \frac{N}{n(1 - G(x))} \quad \text{avec} \quad N : \text{nombre d'années d'observations (50) et}$$

$n : \text{taille de l'échantillon (4830)}$

Le Tableau V.11 présente quelques exemples de période de retour T pour des valeurs données de pollution (MES_{tot}, MES_{moy} et MES_{max}) sur le site d'Entzheim. On peut rapprocher ces valeurs de celles observées lors de la campagne de mesure et résumées dans le Tableau II.2.

MES _{tot}	Gthéo-rique	T en années	T en jours	MES _{moy}	Gthéo-rique	T en années	T en jours	MES _{max}	Gthéo-rique	T en années	T en jours
100	0,082	0,0113	4,1	100	0,131	0,0119	4,3	100	0,044	0,0108	4,0
250	0,159	0,0123	4,5	200	0,254	0,0139	5,1	250	0,129	0,0119	4,3
500	0,255	0,0139	5,1	300	0,361	0,0162	5,9	500	0,258	0,0139	5,1
750	0,332	0,0155	5,6	400	0,452	0,0189	6,9	750	0,371	0,0164	6,0
1000	0,395	0,0171	6,2	500	0,531	0,0220	8,0	1000	0,468	0,0194	7,1
1250	0,449	0,0188	6,9	600	0,598	0,0257	9,4	1250	0,551	0,0230	8,4
1500	0,497	0,0206	7,5	700	0,656	0,0301	11,0	1500	0,622	0,0274	10,0
2000	0,576	0,0244	8,9	800	0,705	0,0351	12,8	2000	0,733	0,0387	14,1
2500	0,639	0,0286	10,4	1000	0,784	0,0480	17,5	3000	0,868	0,0786	28,7
3000	0,690	0,0334	12,2	1500	0,901	0,1048	38,3	4000	0,936	0,1614	58,9
4000	0,768	0,0446	16,3	2000	0,955	0,2297	83,9	5000	0,969	0,3345	122
5000	0,824	0,0586	21,4	2500	0,979	0,5045	184	6000	0,985	0,6988	255
6500	0,880	0,0865	31,5					7500	0,995	2,1335	779

Tableau V.11 : Quelques périodes de retour pour des valeurs de pollution données

D'après ces calculs, il y aurait lessivage complet du stock de pollution (MES_{tot}) sur le bassin versant d'Entzheim, avec une périodicité de 31,5 jours soit 11 à 12 fois par an, la concentration moyenne maximale serait observée 2 fois par an, alors que la concentration maximale serait atteinte tout les deux ans. On remarquera que pour la pollution on n'atteint pas la période de retour décennale que nous cherchions à définir en début de problème.

L'échantillon de pollution, que nous avons observé, présente une valeur maximale de 989 kg pour les MES_{tot}, ce qui correspond à une période de retour de 6,2 jours. Cette valeur peut paraître

relativement faible. Mais, il faut se replacer dans le contexte. En effet, on a observé qu'il a plu 991 fois sur 10,25 année, soit environ 97 fois par an, ce qui correspond en moyenne à une pluie tous les 3,8 jours. La valeur maximale observée est donc supérieure aux valeurs observées couramment, sans pour autant être exceptionnelle.

La valeur maximale observée pour les concentrations moyennes est de 1541mg/l. Cette valeur apparaît en moyenne une fois par mois.

La valeur maximale observée pour les concentrations maximales instantanées est de 3732mg/l, ce qui correspond à une période de retour de 48 jours, soit entre 7 et 8 fois par an.

Afin de prévenir toute extrapolation éventuelle, dans la détermination des périodes de retour d'événement de pollution, à partir des données de pluviométrie, il convient de rappeler que ces résultats ont été obtenus sur le site d'Entzheim et qu'il ne faut en aucun cas vouloir obtenir une période de retour pour des événements situés hors des limites fixées ici.

2.4. Comparaison des lois de fréquences

Les résultats issus de la modélisation, quelle qu'elle soit (Tableau V.10), sont conformes aux conclusions bibliographiques (Marquet, 1993; Saget, 1995). En effet, il a été montré que la pollution urbaine par temps de pluie est conditionnée par le temps sec précédant l'événement pluvieux et au moins un paramètre de pluviométrie. Aussi peut-on se poser la question : n'existe-t-il pas une relation simple liant les fréquences au non dépassement des variables de pluviométrie et du temps sec à celles de la pollution?

Il a donc été décidé de comparer les diverses lois de fréquence au non dépassement des couples avec les lois de Weibull obtenues pour les variables de pollution (MESTot, MESmoy et MESmax), à partir du modèle SWMM-SWMM ci-dessus.

Les lois de fréquences au non dépassement des divers couples Temps Sec/Pluie sont obtenues par la multiplication des fréquences marginales, car le temps sec (TS) et la variable représentative de la pluie, quelle qu'elle soit, sont statistiquement indépendants (Stieber, 1993) (les courbes de : TS/Durée, TS/Htot, TS/Imoy, TS/I60, TS/I20, TS/I5 en Annexe V.10, le montrent bien).

Après avoir essayé différentes combinaisons, et plusieurs changements de variables essentiellement en logarithmes népériens, entre les fréquences obtenues au paragraphe 2.2 et les fréquences au non dépassement des couples temps sec/pluie correspondants, le meilleur résultat obtenu est le suivant pour les MESTot:

$$G(\text{MESTot}) = 0,92 * G(\text{TS / Durée})^{0,58} + 0,10$$

Le coefficient de corrélation ainsi obtenu est de $r=0,75$.

De la même manière on obtient pour le MESmoy et les MESmax:

$$G(\text{MESmoy}) = 1,09 * G(\text{TS} / \text{Htot})^{0,76} + 0,14 \quad \text{avec } r=0,84$$

$$G(\text{MESmax}) = 1,09 * G(\text{TS} / \text{Htot})^{0,78} + 0,14 \quad \text{avec } r=0,84$$

Après nous être intéressés aux couples, nous nous sommes portés sur les variables individualisées de pluie et de temps secs, sans entreprendre la procédure académique de double intégrale sur les divers modèles. En procédant simplement de la même manière que précédemment, après diverses régressions linéaires, effectuées sur les fréquences marginales au non dépassement des variables de pluviométrie, de temps sec et de la pollution définie à partir des modèles, puis sur leurs logarithmes népériens, les résultats suivants ont été obtenus :

$$G(\text{MES}_{\text{tot}}) = 0,95 * G(\text{Htot})^{0,16} * G(\text{Durée})^{0,78} \quad \text{avec } r=0,98$$

$$G(\text{MES}_{\text{moy}}) = 1,09 * G(\text{Htot})^{1,04} * G(\text{TS})^{0,52} + 0,14 \quad \text{avec } r=0,85$$

$$G(\text{MES}_{\text{max}}) = 1,08 * G(\text{Htot})^{1,02} * G(\text{TS})^{0,57} + 0,15 \quad \text{avec } r=0,85$$

Les corrélations ainsi obtenues sont supérieures à celles obtenus à partir des fréquences au non dépassement des couples temps-sec/pluie. De plus on notera que la meilleure corrélation obtenue pour les MES_{tot} n'est pas fonction du temps sec comme on pouvait s'y attendre, mais de deux variables de pluviométrie, c'est-à-dire de la hauteur totale et de la durée de la pluie.

On dispose ainsi rapidement d'un ordre de grandeur de la fréquence d'apparition d'un événement de pollution, caractérisé au moyen de l'une des variables étudiées, sur Entzheim. Ces valeurs sont obtenues au moyen de simples études statistiques de pluviométrie.

Il serait intéressant de faire la même démarche sur d'autres sites, afin de confirmer cette démarche et de tenter une généralisation de cette détermination simple et facile d'une période de retour pour la pollution.

3. Conclusion

Nous avons d'abord montré que le calage des modèles globaux, de nature plus physique que les régressions linéaires, donc potentiellement transposables sur d'autres sites, conduisait à des résultats convenables et comparables à ceux obtenus par les régressions linéaires. Nous avons ensuite utilisé ses modèles pour construire un générateur de pollution, qui nous permette de

déterminer la période de retour d'un événement de pollution courant d'un point de vue de ses caractéristiques pluviométriques.

Enfin, après avoir calé une loi de Weibull sur la partie de l'échantillon inférieur au seuil de production du bassin versant, nous avons montré qu'il était possible d'estimer rapidement l'ordre de grandeur de cette même fréquence au non dépassement aux moyens simplement des fréquences au non dépassement de deux paramètres de pluviométrie.

CONCLUSION

CONCLUSION

➤ *Les données de pollution*

Le choix du site d'Entzheim s'inscrit dans une étude d'ensemble.

Comparées aux données disponibles sur chaque site de la base de donnée QASTOR (Saget, 1995), les données de pollution disponibles sur Entzheim, bien que relativement importantes en durée et en nombre, n'ont pas permis de procéder aux calages habituels de modèles, en réservant une partie de l'échantillon pour la validation.

La critique des données indique, par rapport aux seuils que nous nous sommes fixés, en rapport avec les capacités du bassin versant, et après analyse des éléments de pluviométrie, que nous n'avons pas observé d'événement de pollution particulièrement rare. Aussi le calage des modèles a été réalisé sur des valeurs courantes.

➤ *Les modèles de prédiction de la pollution*

L'utilisation de modèles globaux simples pour la prédiction de la pollution présente l'avantage d'être transposable d'un site à l'autre, ce qui n'est pas le cas des régressions linéaires. L'élaboration des modèles simples utilisés au cours de ce travail résulte d'une assez longue période d'ajustement, en raison de la complexité des mécanismes de production de pollution sur ce bassin. La constitution de dépôts dans le réseau complique sérieusement l'interprétation des enregistrements et n'ont finalement pas été modélisés. Cependant, les résultats du calage des modèles obtenus sur le site d'Entzheim sont très prometteurs. Bien que légèrement inférieurs aux régressions linéaires du point de vue des corrélations, ils sont satisfaisants et permettent une prédiction convenable de la pollution.

La transposition sur les variables MESmax/h, MESmoy et MESmax, des modèles écrits pour la prédiction de la variable MES_{tot}, conduit à des résultats convenables pour les MESmoy et MESmax. Elle mériterait d'être mieux approfondie et conduirait peut être à de meilleurs résultats. Par contre, pour les charges horaires (MESmax/h), il faudrait reconsidérer les caractéristiques de cette variable, pour redéfinir un modèle plus concluant.

"N'ayant qu'une vague idée" des valeurs que certains paramètres des modèles sont susceptibles de prendre, nous avons choisi de les borner en utilisant partiellement la technique du "Jackknife". De cette façon, l'erreur commise sur la détermination des divers paramètres a été relativisée.

Notons également que le comportement des modèles mériterait d'être vérifié pour des événements importants, afin de valider l'extrapolation qui en a été faite.

➤ *La caractérisation de la pollution*

La technique décrite dans la deuxième partie du Chapitre V, permet enfin non pas de donner, mais d'approcher la période de retour d'un événement de pollution sur le site d'Entzheim, simplement à partir de ses caractéristiques de pluviométrie. Cette démarche nouvelle, peut paraître audacieuse, aussi une mise en garde s'impose.

Les périodes de retour données au dixième de jour dans le Tableau V.11, sont à relativiser. En effet, il est illusoire de vouloir prétendre donner avec certitude, une période de retour avec cette précision, compte tenu des incertitudes liées à la détermination des valeurs des variables. En réalité, il serait plus raisonnable de donner un encadrement de cette période de retour. La fréquence théorique nous renseigne sur la rareté d'un événement.

Les résultats obtenus sur Entzheim tendent à montrer que le bassin versant est lessivé par un événement pluvieux se produisant une douzaine de fois par an, soit une fréquence mensuelle. Il est alors tentant de rappeler que c'est précisément la pluie mensuelle (15 l/s/ha) qui est utilisée en Alsace pour le dimensionnement des bassins d'orage. En outre, il faut rappeler que ces lois ne doivent en aucun cas être utilisées pour déterminer une période de retour d'un événement aux caractéristiques supérieures à celles mentionnées comme seuil.

➤ *Les perspectives*

La démarche adoptée dans cette étude est facilement transposable. Il serait intéressant de poursuivre cette réflexion sur des données de pollution d'autres sites. Une première démarche pourrait consister en l'utilisation des données de la base QASTOR (Saget, 1995) pour valider les résultats.

Après avoir validé la démarche sur divers autres sites, il serait intéressant d'entreprendre une étude de généralisation des formules. Celles-ci, tiendraient compte de diverses composantes spécifiques des bassins versants considérés, à l'image de la démarche qui avait été adoptée pour la détermination de la formule de Montana, dans le cadre du dimensionnement des ouvrages d'assainissement.

Ce travail d'ébauche de caractérisation de la pollution mérite d'être approfondi, car il devrait permettre, à terme, d'encadrer la période de retour d'un événement de pollution, à partir de ses composantes de pluviométrie, sur n'importe quel bassin versant.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALLEY W.M., SMITH P.E.; 1981.

Estimation of accumulation parameters for urban runoff quality modeling.

Water Resources Research, 1981, vol 17, n°6.

pp 1657-1664.

ARTIERES O.; 1985.

Définition d'une campagne de mesures en vue de l'étude du fonctionnement d'un bassin d'orage.

E.N.I.T.R.T.S. Strasbourg - Mémoire d'Ingénieur.

165 p.

ARTIERES O.; 1987.

Les dépôts en réseau d'assainissement. Origine, caractéristiques, pollution, transport.

Thèse U.niversité Louis Pasteur de Strasbourg.

214 p.

ARTIERES O.; 1988.

Peut-on éviter les dépôts en réseau d'assainissement unitaire?

T.S.M. - L'eau N°9

pp 443-448.

BELLEFLEUR D.; Novembre 1989.

Suivi d'un réseau d'assainissement unitaire - Synthèse de deux campagnes de mesure.

T.S.M. - L'eau N°11.

pp 561 à 572.

BERTRAND-KRAJEWSKI J-L.; 1991.

Modélisation des débits et du transport solide en réseau d'assainissement. Etude bibliographique.

Rapport E.N.I.T.R.T.S. Strasbourg / I.M.F./ U.L.P.

207 p.

BERTRAND-KRAJEWSKI J-L.; Avril 1992.

Modélisation conceptuelle du transport solide en réseau d'assainissement unitaire.

Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg.

205 p.

BERTRAND-KRAJEWSKI J-L., BELLEFLEUR D.; 1991.

Entzheim - Données expérimentales : Pluie - Débit - Solides en suspension - 1987-1988.

Rapport E.N.I.T.R.T.S. Direction de la Recherche.

267 p.

BEYER G.; 1987.

Mise en oeuvre d'une station de mesure de flux de pollution. Application au bassin d'orage d'Entzheim.

E.N.I.T.R.T.S. Strasbourg - Mémoire d'Ingénieur.

116 p.

BOURRIER R, 1985.

Les réseaux d'assainissement - Calculs, Applications, Perspectives.

TEC et DOC-lavoisier, Paris.

484 p.

BUJON G., HERREMANS L.; 1990.

FLUPOL: modèle de prévision des débits et des flux polluants réseaux d'assainissement par temps de pluie. Calage et Validation.

La Houille Blanche, 1990, n°2.

pp 123 - 139.

CALOT G.;1965.

Cours de statistique descriptive.

Dunod Décision.

488 p.

CALOT G.;1967.

Cours de calcul des probabilités.

Dunod.

478 p.

CARRA P-O.; Juin 1988.

Exploitation d'une station de mesures de flux de matières polluantes au bassin d'orage d'Entzheim.

E.N.I.T.R.T.S. Strasbourg - Mémoire d'Ingénieur.

Tome 1 - 104 p.

CHEBBO G.; 1992.

Solide des rejets pluvieux urbains: caractérisation et traitabilité.

Thèse ENPC.

400 p.

CHEBBO G., MOUCHEL J-M., SAGET A., GOUSAILLES M.; Novembre 1995

La pollution des rejets urbains par temps de pluie: flux, nature et impacts.

T.S.M. - L'eau N°11

pp 796 à 806.

circulaire de 1977 n°77.284/INT

Instruction technique relative aux réseaux d'assainissement des agglomérations.

Imprimerie Nationale.

Volume texte 62 p.

CIRIA; 1987.

Sediment movement in combined sewerage and storm-water drainage systems.

Ciria, London

200 p.

COLIN, MEUNIER, PUECH; Mai 1972.

Problèmes hydrologiques relatifs à l'étude des crues.

Centre National d'Etudes Techniques et de Recherches Technologiques pour l'Agriculture, les Forêts et l'Équipement Rural.

72 p.

CROLEY T.; 1978.

Ralston Creek hourly precipitation model.

Water Resources Research - vol 14, N°3.

pp 485 à 490.

C.T.G.R.E.F.; Septembre 1978.

Utilisation de quelques tests en hydrologie et calcul d'intervalles de confiances.

Informations Techniques - Cahier 31, N°2.

4 p.

C.T.G.R.E.F.; Décembre 1979.

Estimation d'une durée de retour à partir d'une série courte.

Informations Techniques - Cahier 36, N°5.

4 p.

C.T.G.R.E.F.; septembre 1980.

Analyse expérimentale des échantillons de valeurs supérieures à un seuil

DHHF-Hydrologie - Note du 08.09.80.

6 p.

DESBORDES M., RAOUS P., TREVISOL Y.; Décembre 1982.

Méthodologie de calage des modèles de ruissellement urbain.

Laboratoire d'hydrologie mathématique de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc de Montpellier- Service Technique de l'Urbanisme.

121 p.

DESBORDES M., 1984.

Modèle de Caquot. Révision de la correction des débits de pointes en fonction de l'allongement des bassins versants.

T.S.M. - L'eau n°7.

pp 381-385.

FNDAE., 1988.

Les bassins d'orage sur les réseaux d'assainissement. Expérience acquise à partir des réalisations actuelles.

Ministère de l'Agriculture - Bureau des Services Publics Ruraux - Agence de l'Eau Artois-Picardie - Document technique n°6.

61p.

GALLOY E., MARTIN S., LEBRETON A.; Mars 1982.

Analyse des séquences de jours secs consécutifs. Application à 31 postes du réseau météorologique Français.

Sciences et Techniques, La Météorologie, VIème Série, N°28.

pp 5 à 24.

GIERSCH P., (sans date).

Les rejets urbains par temps de pluie.

D.D.A.F. du Bas-Rhin, Bureau d'Étude.

6 p.

HEMAIN J-C., Août 1985.

La pollution du ruissellement pluvial urbain. - Campagne de mesure expérimentale Française-1980-1982.

Rapport de synthèse - Laboratoire d'hydrologie mathématique de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc de Montpellier- Service Technique de l'Urbanisme.

80 p.

HEMAIN J-C.; mars-avril 1991.

Modélisation mathématique en assainissement pluvial urbain.

Bulletin de liaison Laboratoire des Ponts et Chaussées; Réf. 3561.

pp 65-78.

JEWELL T.K.; ADRIAN D.D.; octobre 1978.

SWMM Stormwater Pollutant Washoff Functions.

Journal of the Environmental Engineering Division, vol 104, n°5.

pp 1036-1040.

JEWELL T.K.; ADRIAN D.D.; 1981.

Development of Improved Stormwater quality Models.

Journal of the Environmental Engineering Division, vol 107, n°EE5.

pp 957-974.

KARPLUS W.J.; 1983.

The Spectrum of Mathematical Model.

Perspectives in computing, vol 3, n°2.

pp 4-13.

KRAUTH K.H.; STOTZ G.; 1985

Minimierung des Schutzstoffeintrags aus Siedlungsgebieten in Vorfluter. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben Kr 624/3-2.

Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte und Abfallwirtschaft, Universität Stuttgart.

231 p.

LABORDE J-P.; juin 1987.

Eléments d'hydrologie de surface - Tome 2 : critique et analyse statistique des données hydrologiques.

Cours de formation initiale à l'E.N.I.T.R.T.S.

99 p.

LABORDE J-P.; octobre 1994.

Programme de régression et macrocomandes d'analyses statistiques élémentaires en hydrologie.

J.P. LABORDE, Laboratoire d'Analyse Spatiale, Université de Nice.

Communication personnelle.

LEBART L.; 6,7,8, décembre 1995.

Méthodes Factorielles (Rappels).

Statistique et Méthodes Neuronales / Ecole Modulad - ASU / Support de cours - organisé à Montpellier par : CNUSC et LIRMM.

pp 4.1 à 4.20.

LEBART L.; 6,7,8, décembre 1995.

Validation et rééchantillonnage.

Statistique et Méthodes Neuronales / Ecole Modulad - ASU / Support de cours - organisé à Montpellier par : CNUSC et LIRMM.

pp 9.1 à 9.21.

LLAMAS J.; 1993.

Hydrologie générale: Principes et applications.

Gaëtan Morin éditeur; 2^{ème} édition.

526 p.

MARQUET R.; 1993.

Répartition du flux polluant au cours du ruissellement pluvial urbain - Influence sur les volumes à traiter.

Mémoire de DEA Mécanique et Ingénierie - Filière : Sciences et techniques de l'eau.

U.L.P. louis pasteur - E.N.G.E.E.S - C.E.R.G.R.E.N.E.

82 p.

MARTIN S., PELTIER J-P.; 1986.

Séquences de jours secs consécutifs en Maurienne (Alpes Françaises).

Travaux Scientifiques, Parc national de la Vanoise, XV,9-30.

pp 9 à 30.

MICROSOFT.; 1992

Fonctions et Macros de Microsoft Excel.

709 p.

PHILIPPEAU G.; Novembre 1986.

Comment interpréter les résultats d'une analyse en composantes principales?

Service des Etudes Statistiques, Institut Technique des Céréales et des Fourrages.

63 p.

REMENIERAS G.; 1960.

L'hydrologie de l'ingénieur.

Eyrolles.

413 p.

ROCHE M.;1963.

Hydrologie de surface.

ORSTOM, éd Gauthier-Villars.

430 p.

SAGET A.; 1995.

Base de données sur la qualité des rejets urbains de temps de pluie : distribution de la pollution rejetée - Dimensions des ouvrages d'interception.

Thèse ENPC.

227 p.

SAPORTA G.; 1990.

Probabilités - Analyse des données et statistique.

Technip.

488 p.

SARTOR J.D., BOYD G.B., AGARDY F.J.; 1974.

Water pollution aspects of street surface contaminants.

Journal of Water Pollution Control Federation, 1974, vol 46, n°3.

pp 458-467.

SERVAT E.; 1984.

Contribution à l'étude des matières en suspension du ruissellement pluvial à l'échelle d'un petit bassin versant urbain.

Thèse U.S.T.L. - Sciences de l'eau et aménagement.

182 p. + annexes.

W. SNEDECOR G., G. COCHRAN W.; 1984.

Méthodes statistiques.

Association de coordination technique agricole - 6ème édition.

Imprimerie Laboureur et Cie.

649 p.

STIEBER P.; 1993.

Essai de caractérisation du couple "temps sec - pluie" en liaison avec la pollution en hydrologie urbaine.

Mémoire de DEA Mécanique et Ingénierie - Filière : Sciences et techniques de l'eau. U.L.P. - E.N.G.E.E.S.

200 p.

STOTZ G., KRAUTH K.H.; 1984.

Factors affecting first flushes in combined sewers.

3ème Conf. on Urban Storm Drainage, Göteborg, vol 3

pp 869-878.

STOTZ G., KRAUTH K.H.; 1986.

Depositions in combined sewers and their flushing behaviour.

Urban Drainage Modeling, Dubrovnik, Pergamon Press

pp 443-453.

TOURASSE P.; 1981.

Analyses spatiales et temporelles des précipitations et utilisation opérationnelle dans un système de prévision des crues. Application aux régions Cévenoles.

Thèse de l'Université Scientifique et Médicale et de l'I.N.P.G.

200 p.

VALIRON F., TABUCHI J-P.; 1992.

Maîtrise de la pollution urbaine par temps de pluie, état de l'art.

TEC et DOC-lavoisier, Paris.

564 p.

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Résumé des valeurs des paramètres observées lors de la campagne de mesure de 1982.	27
Tableau I.2 : Domaine de variation des masses annuelles totales et ramenées à la surface active et des concentrations moyennes annuelles.....	27
Tableau I.3 : Par événement, domaine de variation des masses les plus grandes, totales et ramenées à la surface active, des concentrations moyennes les plus grandes et de la masse la plus grande ramenée à la masse annuelle.	28
Tableau I.4 : Comparaison théorique des rejets pour différents systèmes de collecte.	28
Tableau II.1 : Résumé des principales caractéristiques du bassin d'Entzheim.	43
Tableau II.2 : Caractéristiques des 38 événements de pollution retenus.	53
Tableau III.1 : Présentation des principales caractéristiques des variables de pluies et de temps sec.	60
Tableau III.2 : Auto-corrélation entre les variables de pluviométrie.	62
Tableau III.3 : Résumé des paramètres de calage de lois et des tests d'ajustement sur les variables de pluviométrie.....	65
Tableau III.4 : Présentation des principales caractéristiques des variables de pluies, de temps sec et de pollution.....	66
Tableau III.5 : Périodes de retour maximales observées pour les paramètres d'hydrologie sur l'échantillon de pollution.	67
Tableau III.6 : Charges maximales observées et caractéristiques des pluies correspondantes.	68
Tableau III.7 : Comparaison du domaine de variation des concentrations moyennes (mg/l) d'Entzheim avec des sites analogues.	69
Tableau III.8 : Comparaison du domaine de variation des concentrations maximales (mg/l) d'Entzheim avec d'autres mesures.	69
Tableau III.9 : Auto-corrélation entre les variables de pluviométrie sur l'échantillon de pollution.	70
Tableau III.10 : Corrélations entre les variables de pollution et les variables de pluviométrie de l'échantillon de pollution.	71
Tableau III.11 : Résultats des régressions linéaires multiples sans changement de variable.....	73
Tableau III.12 : Résultats des régressions linéaires multiples avec changements de variables en $\ln(X_i)$	74
Tableau III.13 : Résultats des régressions linéaires multiples avec changements de variables en $1/X_i$	74

Tableau III.14 : Résultats des régression linéaires multiples avec changements de variable sen eX_i	74
Tableau III.15 : Résultats des régressions linéaires multiples avec changements de variables multiples.	74
Tableau III.16 : Récapitulatif des variations des paramètres de pollution en fonction des variables de pluviométrie.....	76
Tableau IV.1 : Equations complètes des modèles de production de pollution suite à un épisode pluvieux.....	91
Tableau IV.2 : Expressions mathématiques des modèles testés	93
Tableau V.1 : Détermination des valeurs du jeu de paramètres sur les 4 modèles pour MESTot.....	100
Tableau V.2 : Présentation des paramètres résultant du calage obtenus pour MESTot sur l'échantillon de 38 événements	101
Tableau V.3 : Présentation des paramètres résultant du calage obtenus pour MESTot sur un échantillon réduit de 34 événements.....	105
Tableau V.4 : Erreur supplémentaire de prédiction sur les quatre individus exclus de l'échantillon MESTot.....	107
Tableau V.5 : Adaptation des modèles, définition des nouvelles constantes	116
Tableau V.6 : Détermination des bornes des paramètres pour les 4 modèles et calage de ceux-ci sur les échantillons complets et réduits, réalisés sur MESmax/h, MESmoy et MESmax/h	117
Tableau V.7 : Erreur supplémentaire de prédiction sur les cinq individus exclus de l'échantillon.....	123
Tableau V.8 : Erreur supplémentaire de prédiction sur les trois individus exclus de l'échantillon.....	125
Tableau V.9 : Erreur supplémentaire de prédiction sur les trois individus exclus de l'échantillon.....	126
Tableau V.10 : Expression mathématique des modèles obtenus selon la variable considérée	127
Tableau V.11 : Quelques périodes de retour pour des valeurs de pollution données	134

Liste des figures

Figure I.1 : Circulation de la pollution en milieu urbain d'après Geiger (in Marquet,1993).25

Figure I.2 : Détermination des régions de pluviométrie homogène, annexe II de la circulaire interministérielle de 1977.33

Figure II.1 : Localisation de la commune d'Entzheim.....38

Figure II.2 : Schématisation du village et du réseau d'assainissement d'Entzheim d'après Artières (1985).38

Figure II.3 : Equipement du bassin d'orage d'Entzheim.....40

Figure II.4 : Distribution de la pluie au cours du temps.43

Figure II.5 : Description d'un événement pluvieux d'après Tourasse (1981).43

Figure II.6 : Description du découpage en événements de la chronique de pluviométrie de pluie et de temps sec retenu.47

Figure II.7 : Exemple de fiche signalétique pour l'événement 105.1.....51

Figure II.8 : Exemple de graphiques de visualisation des enregistrements pour l'événement 105.1.52

Figure III.1 : Variation annuelle du nombre d'événements sur 10,25 années d'observations.....57

Figure III.2 : Variation annuelle des variables : Durée de l'événement, Hauteur totale et Temps secs Précédents, représentée par les moyennes et les écarts-types.58

Figure III.3 : Variation annuelle des variables Intensité moyenne, intensité moyenne maximale sur 60, 20 et 5 min représentée par les moyennes et les écarts-types.58

Figure III.4 : Résultat de l'A.C.P. sur les moyennes et écarts-types des variables de pluie, représentation des individus "mois".59

Figures III.5 : Représentation graphique en box & plot des variations des variables de pluie et de temps sec.61

Figures III.6 : Représentation des cercles de corrélation sur les plans C1-C2, C1-C3 et C2-C3 des échantillons de pluviométrie d'hiver (à gauche) et d'été (à droite).63

Figures III.7 : Représentation graphique en box & plot des variations des variables de pluie (à gauche) et des paramètres de pollution (à droite).66

Figures III.8 : Résultats graphiques de l'A.C.P. sur l'échantillon de pollution. Cercles de corrélation des composantes principales (à gauche) et plan de représentation des axes principaux (à droite).72

Figure IV.1 : Représentation schématique d'un modèle.79

Figure IV.2 : Représentation très simplifiée des différents mécanismes producteurs de pollution en assainissement urbain.84

Figure IV.3 : Accumulation des solides dans les rues en fonction de la durée depuis la dernière pluie ou le dernier lavage.....	85
Figure IV.4 : Comparaison des variations de M_0 suivant l'usage du modèle SWMM ou Servat et selon la valeur retenue pour A.....	92
Figure V.1 : Comparaison des modèles calés pour MESTot sur un échantillon de 38 valeurs	102
Figure V.2 : Variation de la somme des carrés des écarts après suppression d'un individu sur l'échantillon de MESTot.....	103
Figure V.3 : Variation du coefficient de corrélation après suppression d'un individu sur l'échantillon de MESTot.....	103
Figure V.4 : Variation du coefficient de détermination après suppression d'un individu sur l'échantillon de MESTot.....	103
Figure V.5 : Modèle SWMM-SWMM calé sur un échantillon de MESTot réduit	106
Figure V.6 : Modèle Servat-SWMM calé sur un échantillon de MESTot réduit.....	106
Figure V.7 : Modèle SWMM-Servat calé sur un échantillon de MESTot réduit.....	106
Figure V.8 : Modèle Servat-Servat calé sur un échantillon de MESTot réduit.....	106
Figure V.9: Répercussion des erreurs sur "a1" dans la prédiction des MESTot par le modèle SWMM-SWMM	108
Figure V.10 : Répercussion des erreurs sur "b1" dans la prédiction des MESTot par le modèle SWMM-SWMM	108
Figure V.11 : Répercussion des erreurs sur "c1" dans la prédiction des MESTot par le modèle SWMM-SWMM	108
Figure V.12 : Répercussion des erreurs sur "a2" dans la prédiction des MESTot par le modèle Servat-SWMM.....	109
Figure V.13 : Répercussion des erreurs sur "b2" dans la prédiction des MESTot par le modèle Servat-SWMM.....	110
Figure V.14 : Répercussion des erreurs sur "c2" dans la prédiction des MESTot par le modèle Servat-SWMM.....	110
Figure V.15 : Répercussion des erreurs sur "d2" dans la prédiction des MESTot par le modèle Servat-SWMM.....	110
Figure V.16 : Répercussion des erreurs sur "e2" dans la prédiction des MESTot par le modèle Servat-SWMM.....	110
Figure V.17 : Répercussion des erreurs sur "a3" dans la prédiction des MESTot par le modèle SWMM-Servat.....	111
Figure V.18 : Répercussion des erreurs sur "b3" dans la prédiction des MESTot par le modèle SWMM-Servat.....	111
Figure V.19 : Répercussion des erreurs sur "c3" dans la prédiction des MESTot par le modèle SWMM-Servat.....	112

Figure V.20 : Répercussion des erreurs sur "d3" dans la prédiction des MESTot par le modèle SWMM-Servat.....	112
Figure V.21 : Répercussion des erreurs sur "e3" dans la prédiction des MESTot par le modèle SWMM-Servat.....	112
Figure V.22 : Répercussion des erreurs sur "f3" dans la prédiction des MESTot par le modèle SWMM-Servat.....	112
Figure V.23 : Répercussion des erreurs sur "a4" dans la prédiction des MESTot par le modèle Servat-Servat.....	113
Figure V.24 : Répercussion des erreurs sur "b4" dans la prédiction des MESTot par le modèle Servat-Servat.....	113
Figure V.25 : Répercussion des erreurs sur "c4" dans la prédiction des MESTot par le modèle Servat-Servat.....	113
Figure V.26 : Répercussion des erreurs sur "d4" dans la prédiction des MESTot par le modèle Servat-Servat.....	114
Figure V.27 : Répercussion des erreurs sur "e4" dans la prédiction des MESTot par le modèle Servat-Servat.....	114
Figure V.28 : Répercussion des erreurs sur "f4" dans la prédiction des MESTot par le modèle Servat-Servat.....	114
Figure V.29 : Comparaison des modèles calés pour MESmax/h sur un échantillon de 38 valeurs	118
Figure V.30 : Comparaison des modèles calés pour MESmoy sur un échantillon de 38 valeurs	119
Figure V.31 : Comparaison des modèles calés pour MESmax sur un échantillon de 38 valeurs	119
Figure V.32 : Modèle SWMM-SWMM calé sur un échantillon de MESmax/h réduit	122
Figure V.33 : Modèle Servat-SWMM calé sur un échantillon de MESmax/h réduit.....	122
Figure V.34 : Modèle SWMM-Servat calé sur un échantillon de MESmax/h réduit.....	122
Figure V.35 : Modèle Servat-Servat calé sur un échantillon de MESmax/h réduit	122
Figure V.36 : Modèle SWMM-SWMM calé sur un échantillon de MESmoy réduit	124
Figure V.37 : Modèle Servat-SWMM calé sur un échantillon de MESmoy réduit.....	124
Figure V.38 : Modèle SWMM-Servat calé sur un échantillon de MESmoy réduit.....	124
Figure V.39 : Modèle Servat-Servat calé sur un échantillon de MESmoy réduit.....	124
Figure V.40 : Modèle SWMM-SWMM calé sur un échantillon de MESmax réduit	125
Figure V.41 : Modèle Servat-SWMM calé sur un échantillon de MESmax réduit.....	125
Figure V.42 : Modèle SWMM-Servat calé sur un échantillon de MESmax réduit.....	126
Figure V.43 : Modèle Servat-Servat calé sur un échantillon de MESmax réduit	126
Figure V.44 : Génération de 50 années d'observations de MESTot selon les divers modèles	131
Figure V.45 : Génération de 50 années d'observations de MESmoy selon les divers modèles.....	131

Figure V.46 : Génération de 50 années d'observations de MESmax selon les divers modèles..... 132
FigureV.47 : Ajustement à une loi de Weibull de l'échantillon de MESTot généré..... 133

Liste des abréviations utilisées**Sigles des Organismes cités**

C.E.M.A.G.R.E.F.	: CEntre national du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et Forêts.
C.E.R.G.R.E.N.E.	: Centre d'Enseignement et de Recherche Gestion des REssources Naturelle et de l'Environnement.
D.D.A.F.	: Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt.
E.N.G.E.E.S.	: Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg (ancien E.N.I.T.R.T.S.).
E.N.I.T.R.T.S.	: Ecole Nationale des Ingénieurs des Travaux Ruraux et des Techniques Sanitaires.

Notations

A.C.P.	: Analyse en Composantes Principales
B.V.	: Bassin Versant
B.V.E.	: Bassin(s) Versant(s) Expérimental(aux)
date	: jours/mois/année.
DDEB	: Date de DEBbut de l'événement (date)
DDEBTS	: Date de DÉBut de Temps Sec (date)
DREF	: Date de REFérence (date) soit le 01/01/1968
DUREE	: durée de l'événement (min)
Durée évt	: durée de l'événement pluvieux (jours)
DURUI	: DURée du RUIssellement (min)
e ²	: somme des carrés des écarts
H	: Hauteur de pluie tombée pendant l'événement (mm)
h	: heure
ha	: hectare
ha-act	: hectare actif (surface totale multipliée par le coefficient d'imperméabilisation)
HDEB	: Heure de DEBBut de l'événement (h)
HFIN	: Heure de FIN de l'événement (h)
HP	: Helwett-Packard
Htot	: Hauteur totale de pluie tombée (mm)
I	: Intensité de la pluie (l/s/ha)
Imoy	: Intensité moyenne de l'événement (mm/h)
Imoymax	: Intensité moyenne maximale sur une durée donnée (mm/h)
I 5	: Pluie dont l'intensité moyenne maximale est calculée sur 5 min
I 20	: Pluie dont l'intensité moyenne maximale est calculée sur 20 min
I 60	: Pluie dont l'intensité moyenne maximale est calculée sur 60 min

kg:ha-act	: kilogramme par hectare actif
l/s/ha	: litre par seconde par hectare
MES	: Matière En Suspension
MESmax	: concentration maximale de MES (mg/l)
MESmax/h	: charge maximale horaire de MES (kg/h)
MESmoy	: concentration moyenne de MES (mg/l)
MES _{tot}	: masse totale de MES au cours d'un événement (kg)
MINDEB	: MINute de DEBut de l'événement (mn)
MINFIN	: MINute de FIN de l'événement (mn)
mm	: millimètre
PC	: Personal Computer
Q _{max}	: débit maximum
R ²	: coefficient de détermination
r	: coefficient de corrélation
SWMM	: Storm Water Managment Model
TDA _{Ab}	: Temps de Début Absolu (jours précis au 1/1000)
TDA _{AbTS}	: Temps de Début Absolu de Temps Sec (jours précis au 1/1000)
TFA _{Ab}	: Temps de Fin Absolu (jours précis au 1/1000)
TFA _{AbTS}	: Temps de Fin Absolu de Temps Sec (jours précis au 1/1000))
TS	: durée de Temps (jours)
v.a.	: variable aléatoire

symboles

Cd	: Cadmium
DBO ₅	: Demande Biochimique en Oxygène à 5 jours
DCO	: Demande Chimique en Oxygène
HAP	: Hydrocarbures Aromatiques Polyconjugués
NH ₄ ⁺	: ammonium
NTK	: azote Kjeldhal
P	: Phosphore (total)
Pb	: Plomb
PCB	: Poly-Chloro Biphényles
PO ₄ ³⁻	: phosphate
Zn	: Zinc

ANNEXES

Liste des Annexes

ANNEXE II - Résumé des caractéristiques des séquences d'enregistrement de la pollution	169
ANNEXE III.1 - Quelques rappels de statistique	177
ANNEXE III.2 - A.C.P. sur les moyennes et écarts types mensuels des variables de pluviométrie.....	183
ANNEXE III 3.1 - A.C.P. sur les variables de pluviométrie d'hiver.....	188
ANNEXE III 3.2 - A.C.P. sur les variables de pluviométrie d'été	193
ANNEXE III.4 - Résultats graphiques des ajustements de lois sur les échantillons d'hiver et d'été des variables de pluviométrie	198
ANNEXE III.5 - A.C.P. sur les variables de pluviométrie et de pollution	205
ANNEXE V.1 - Détermination des bornes de variation des paramètres - Calage des modèles pour MES _{tot}	209
ANNEXE V.2 - Résultat du "Jackknife" pour MES _{tot}	213
ANNEXE V.3 - Détermination des bornes de variation des paramètres - Calage des modèles pour MES _{max/h}	214
ANNEXE V.4 - Résultat du "Jackknife" pour MES _{max/h}	218
ANNEXE V.5 - Détermination des bornes de variation des paramètres - Calage des modèles pour MES _{moy}	220
ANNEXE V.6 - Résultat du "Jackknife" pour MES _{moy}	224
ANNEXE V.7 - Détermination des bornes de variation des paramètres - Calage des modèles pour MES _{max}	226

ANNEXE V.8 - Résultat du "Jackknife" pour MESmax.....	230
ANNEXE V.9 - Description du générateur de pollution.....	232
ANNEXE V.10 - Courbes de fréquences des divers couples Temps Sec/Pluie.....	234
ANNEXE V.11 - Tableau de calcul des périodes de retour des 38 événements de pollution	237

ANNEXE II

ANNEXE II - Résumé des caractéristiques des séquences d'enregistrement de la pollution

N° de Fichier	Enregistrement de la POLLUTION				Enregistrement de la PLUIVIOMETRIE						
	Date début	Heure début	Date fin	Heure fin	Date début	Heure début	Date fin	Heure fin	Début de la pluie	Fin de la pluie	Hauteur d'eau
000 O10	30/06/1987	10h00	01/07/1987	9h00	24/03/1987	13h08	25/03/1987	9h04			0
O11	ABS-INF	ABS-INF	ABS-INF	ABS-INF	27/03/1987	14h46	01/04/1987	10h45	27/03/87 à 14h51		
O12					01/04/1987	17h00	02/04/1987	17h16			0
O13					02/04/1987	17h50	06/04/1987	10h33	04/04/87 à 16h51		
O14					06/04/1987	11h42	06/04/1987	13h15			0
O15					06/04/1987	17h04	07/04/1987	17h19	06/04/87 à 17h06		
O16					07/04/1987	17h24	08/04/1987	14h26*	07/04/87 à 18h58		
O17					08/04/1987	12h28***	10/04/1987	9h21	09/04/87 à 4h19		
O18					10/04/1987	17h28	13/04/1987	14h26	10/04/87 à 17h28		
O19					22/04/1987	6h47	24/04/1987	9h07	22/04/87 à 17h31		
O20					25/04/1987	15h55	27/04/1987	14h57	25/04/87 à 15h54		
O21					30/04/1987	10h46	30/04/1987	15h54			0
O22	03/05/1987	10h01	04/05/1987	8h30	30/04/1987	16h55	04/05/1987	11h34	03/05/87 à 10h01	04/05/87 à 11h32	205
O23	04/05/1987	11h00	05/05/1987	6h27	04/05/1987	11h59	05/05/1987	7h42	04/05/87 à 11h59	05/05/87 à 7h37	193
O24					05/05/1987	19h23	07/05/1987	15h58	05/07/87 à 19h43		
O25					07/05/1987	17h00	11/05/1987	13h51	08/05/87 à 0h02		
O26					11/05/1987	14h35	12/05/1987	14h41			0
O27					12/05/1987	15h20	13/05/1987	12h38	12/05/87 à 20h07		
O28					15/05/1987	12h15	15/05/1987	23h06	15/05/87 à 12h15	15/05/87 à 20h22	25

N° de Fichier	Enregistrement de la POLLUTION				Enregistrement de la PLUVIOMETRIE						
	Date début	Heure début	Date fin	Heure fin	Date début	Heure début	Date fin	Heure fin	Début de la pluie	Fin de la pluie	Hauteur d'eau
O29					16/05/1987	19h41	18/05/1987	9h42	17/05/87 à 0h01		
O30	19/05/1987	22h57	22/05/1987	7h08	19/05/1987	18h29	DEFAILLANCES		19/05/87 à 18h34	DEFAILLANCES	
O31	ABSINF	ABSINF	ABSINF	ABSINF	20/05/1987	18h57	22/05/1987	10h00	21/05/87 à 7h44		
O33	27/05/1987	21h58	01/06/1987	9h31	22/05/1987	10h53	01/06/1987	10h22	27/05/87 à 2h59	01/06/87 à 4h29	166
O34	03/06/1987	11h57	05/06/1987	7h38	01/06/1987	12h36	05/06/1987	9h46	03/06/87 à 3h35	05/06/87 à 1h59	236
O35	05/06/1987	12h36	09/06/1987	2h39	05/06/1987	12h02	11/06/1987	14h20	05/06/87 à 12h26	11/06/87 à 6h05	98
O36	11/06/1987	20h06	12/06/1987	11h32	11/06/1987	16h23	12/06/1987	14h12	11/06/87 à 17h29	12/06/87 à 11h08	102
O37					19/06/1987	14h34	19/06/1987	15h00			0
O39					20/06/1987	17h40	22/06/1987	9h10	20/06/87 à 18h45		
O40					22/06/1987	12h45	24/06/1987	8h49	23/06/87 à 16h08		
O41					ERREUR dates		ERREUR dates				
O42					01/07/1987	15h12	04/07/1987	17h04	01/07/87 à 19h31		
O55	ABSINF dates		ABSINF dates		17/09/1987	10h12	18/09/1987	11h34			0
O56	19/09/1987	18h00	ABSINF dates		18/09/1987	13h43	21/09/1987	8h59			0
O57					23/09/1987	16h33	23/09/1987	17h00			0
O58					24/09/1987	14h00	24/09/1987	14h55			0
O59	26/09/1987	2h00	26/09/1987	16h55	25/09/1987	16h09	26/09/1987	17h12	26/09/87 à 1h36	26/09/87 à 17h07	151

N° de Fichier	Enregistrement de la POLLUTION				Enregistrement de la PLUIVIOMETRIE						
	Date début	Heure début	Date fin	Heure fin	Date début	Heure début	Date fin	Heure fin	Début de la pluie	Fin de la pluie	Hauteur d'eau
O60	ABS-INF	ABS-INF	ABS-INF	ABS-INF							
O62					05/10/1987	12h03	06/10/1987	14h15			
O63	ABS-INF	ABS-INF	ABS-INF	ABS-INF							
O64					09/10/1987	10h42	13/10/1987	10h00	09/10/87 à 14h27		
O65					13/10/1987	11h50	15/10/1987	9h02	13/10/87 à 17h57		
O66					16/10/1987	10h57	16/10/1987	12h33	16/10/87 à 11h05		
O67	16/10/1987	19h17	19/10/1987	22h56	16/10/1987	15h08	20/10/1987	10h20	16/10/87 à 18h05	20/10/87 à 7h17	77
O69					21/10/1987	15h34	21/10/1987	20h28	21/10/87 à 19h01		
O70					22/10/1987	8h08	22/10/1987	9h55	22/10/87 à 9h37		
O71	22/10/1987	14h17	23/10/1987	20h09	22/10/1987	10h19	23/10/1987	21h50	22/10/87 à 10h52	23/10/87 à 14h20	15
O72					27/10/1987	11h33	29/10/1987	9h58	28/10/87 à 6h00		
O73	29/10/1987	13h11	02/11/1987	0h56	29/10/1987	11h20	02/11/1987	10h33	01/11/87 à 1h22	02/11/87 à 10h31	18
O74	ABS-INF	ABS-INF	ABS-INF	ABS-INF	02/11/1987	11h54	06/11/1987	9h43			
O75					06/11/1987	9h45	07/11/1987	11h28			
O76	ABS-INF dates		ABS-INF dates								
O77					13/11/1987	12h08	13/11/1987	18h00	13/11/87 à 14h48		
O78	16/11/1987	17h52	17/11/1987	8h26	16/11/1987	16h43	17/11/1987	18h36	16/11/87 à 23h43	17/01/87 à 9h08	21
O79	20/11/1987	5h13	22/11/1987	23h10	19/11/1987	16h28	23/11/1987	0h21	19/11/87 à 23h48	22/11/87 à 23h39	120

N° de Fichier	Enregistrement de la POLLUTION				Enregistrement de la PLUIVIOMETRIE						
	Date début	Heure début	Date fin	Heure fin	Date début	Heure début	Date fin	Heure fin	Début de la pluie	Fin de la pluie	Hauteur d'eau
107	16/03/1988	3h20	17/03/1988	11h12	15/03/1988	10h23	18/03/1988	16h00	16/03/88 à 2h57	18/03/88 à 7h16	159
108	25/03/1988	11h53	27/03/1988	19h14	25/03/1988	11h43	29/03/1988	11h01	25/03/88 à 11h53	28/03/88 à 23h17	175
109	30/03/1988	20h54	02/04/1988	14h13	29/03/1988	12h27	06/04/1988	0h00	29/03/88 à 21h30	01/04/88 à 15h53	60
110					06/04/1988	12h46	12/04/1988	20h00	08/04/88 à 8h03	12/04/88 à 19h59	32
111					14/04/1988	15h27	18/04/1988	11h03	14/04/88 à 0h15	18/04/88 à 11h03	90
112	20/04/1988	11h43	03/05/1988	3h12	20/04/1988	11h39	05/05/1988	12h09	20/04/88 à 11h41	04/05/88 à 1h47	151
113					05/05/1988	12h30	11/05/1988	2h16	07/05/88 à 2h27	09/05/88 à 11h24	123
114	07/06/1988	16h14	13/06/1988	1h58	07/06/1988	12h04	13/06/1988	15h47	07/06/88 à 16h11	13/06/88 à 8h11	145
115					15/06/1988	11h27	17/06/1988	2h07			0
116	ABS-INF	ABS-INF	ABS-INF	ABS-INF	ABS-INF	ABS-INF	ABS-INF	ABS-INF			
117					17/06/1988	11h49	17/06/1988	15h08			0
118	18/06/1988	14h31	19/06/1988	16h39	17/06/1988	15h11	20/06/1988	15h03	19/06/88 à 15h14	19/06/88 à 15h22	44
119					20/06/1988	17h02	22/06/1988	14h41			0
120					22/06/1988	17h43	24/06/1988	16h15			0
121	24/06/1988	17h22	03/07/1988	2h42	24/06/1988	16h24	04/07/1988	14h54	28/06/88 à 14h05	03/07/88 à 2h47	205
122	13/07/1988	19h53	15/07/1988	8h14	13/07/1988	12h19	17/07/1988	12h01	13/07/88 à 19h50	16/07/88 à 16h55	106
123	24/07/1988	13h59	27/07/1988	17h39	22/07/1988	11h02	28/07/1988	13h57	24/07/88 à 0h51	28/07/88 à 5h28	156

N° de Fichier	Enregistrement de la POLLUTION				Enregistrement de la PLUVIOMETRIE						
	Date début	Heure début	Date fin	Heure fin	Date début	Heure début	Date fin	Heure fin	Début de la pluie	Fin de la pluie	Hauteur d'eau
O80	25/11/1987	5h25	25/11/1987	10h10	23/11/1987	15h19	26/11/1987	9h00	25/11/87 à 4h02	25/11/87 à 10h13	31
O81	30/11/1987	15h08	30/11/1987	23h01	27/11/1987	15h27	02/12/1987	9h44	30/11/87 à 15h08	30/11/87 à 22h23	22
O82	ABS-INF dates		ABS-INF dates		02/12/1987	11h17	03/12/1987	12h25			
O83	06/12/1987	6h33	06/12/1987	15h28	03/12/1987	13h37	07/12/1987	15h08	06/12/87 à 1h29	07/12/87 à 7h25	243
O87					14/12/1987	14h46	17/12/1987	14h01	16/12/87 à 1h41	16/12/87 à 22h13	41
O88					18/12/1987	16h19	19/12/1987	8h00	18/12/87 à 16h34	19/12/87 à 5h15	186
O90					07/01/1988	16h35	08/01/1988	16h08			0
O91					08/01/1988	16h47	12/01/1988	9h53	11/01/88 à 1h31	11/01/88 à 7h27	7
O92					12/01/1988	10h40	13/01/1988	13h59			0
O93	17/01/1988	11h59	17/01/1988	14h43	13/01/1988	15h25	18/01/1988	15h34	17/01/88 à 8h46	18/01/88 à 4h01	40
O94					21/01/1988	16h16	21/01/1988	6h18	20/01/88 à 21h40	20/01/88 à 23h24	8
O95	22/01/1988	20h10	24/01/1988	14h06	22/01/1988	9h51	26/01/1988	10h16	22/01/88 à 13h42	25/01/88 à 11h47	52
O96	26/01/1988	14h45	28/01/1988	12h32	26/01/1988	10h23	29/01/1988	14h43	26/01/88 à 11h37	29/01/88 à 14h33	68
O97	29/01/1988	15h16	01/02/1988	10h20							
O98	03/02/1988	6h22	04/02/1988	23h48							
100	10/02/1988	18h09	12/02/1988	14h22	10/02/1988	11h32	12/02/1988	15h00	10/02/88 à 17h15	12/02/88 à 13h31	84
101					12/02/1988	15h44	19/02/1988	9h16	12/02/88 à 16h12	19/02/88 à 7h31	14
102					19/02/1988	10h08	22/02/1988	15h04	20/02/88 à 4h49	22/02/88 à 9h17	9
103					22/02/1988	15h13	23/02/1988	17h10	23/02/88 à 13h28	23/02/88 à 15h39	7
104	ERREUR dates		ERREUR dates		23/02/1988	17h24	01/03/1988	17h42	23/02/88 à 5h26	01/03/88 à 7h32	54
105	12/03/1988	16h40	13/03/1988	23h48	07/03/1988	15h43	14/03/1988	16h59	09/03/88 à 10h32	14/03/88 à 5h31	161

N° de Fichier	Enregistrement de la POLLUTION				Enregistrement de la PLUIVIOMETRIE						
	Date début	Heure début	Date fin	Heure fin	Date début	Heure début	Date fin	Heure fin	Début de la pluie	Fin de la pluie	Hauteur d'eau
125					19/09/1988	10h57	22/09/1988	9h39			0
126	ABS-INF dates		ABS-INF dates		22/09/1988	10h10	23/09/1988	9h00			0
127	30/09/1988	17h11	01/10/1988	6h12	30/09/1988	16h57	04/10/1988	9h12	30/09/88 à 17h10	04/10/88 à 8h10	15
128					04/10/1988	16h14	06/10/1988	10h53	05/10/88 à 4h04	06/10/88 à 4h11	34
130	07/10/1988	18h21	11/10/1988	22h50	07/10/1988	17h26	12/10/1988	9h12	07/10/88 à 17h53	12/10/88 à 9h12	308
131	12/10/1988	10h11	12/10/1988	13h35	12/10/1988	10h00	12/10/1988	14h01	12/10/88 à 10h11	12/10/88 à 11h47	14
132	17/10/1988	7h49	19/10/1988	15h23	13/10/1988	15h22	19/10/1988	20h42	12/10/88 à 20h40	19/10/88 à 20h17	43
133	20/10/1988	11h35	21/10/1988	0h46	20/10/1988	11h07	24/10/1988	15h07	20/10/88 à 11h27	24/10/88 à 13h11	130
134					24/10/1988	16h48	02/11/1988	9h00	24/10/88 à 17h42	2/11/88 à 0h36	314
135					03/11/1988	11h12	06/11/1988	4h01			0
136					08/11/1988	15h08	09/11/1988	14h00			0
137					10/11/1988	14h46	10/11/1988	19h40			0
138					15/11/1988	10h49	15/11/1988	14h00			0
139					ABS-INF	ABS-INF	ABS-INF	ABS-INF			
140					ABS-INF	ABS-INF	ABS-INF	ABS-INF			
150					ERREUR de CODIFICATION						
151					ERREUR de CODIFICATION						
201					21/07/1989	16h40	21/07/1989	17h24			0

N° de Fichier	Enregistrement de la POLLUTION				Enregistrement de la PLUIVIOMETRIE						
	Date début	Heure début	Date fin	Heure fin	Date début	Heure début	Date fin	Heure fin	Début de la pluie	Fin de la pluie	Hauteur d'eau
202					21/07/1989	17h42	22/07/1989	15h09	22/07/89 à 7h43	22/07/89 à 15h09	13
203					22/07/1989	15h10	24/07/1989	7h41	23/07/88 à 9h39	24/07/89 à 7h41	5
204					25/07/1989	16h55	26/07/1989	16h33	26/07/89 à 6h13	26/07/89 à 7h37	7
206					26/07/1989	17h00	28/07/1989	10h00			0
210					28/07/1989	12h21	30/07/1989	8h01	29/07/89 à 1h10	30/07/89 à 3h28	139
211					08/08/1989	17h11	09/08/1989	15h59	09/08/89 à 1h14	09/08/89 à 11h41	6
212					09/08/1989	16h20	09/08/1989	0h00			0

ANNEXES III

ANNEXE III.1 - Quelques rappels de statistique

C'est sans aucune prétention que cette annexe présente quelques rappels qui m'ont paru nécessaires, afin de remettre en mémoire les différentes notions de statistiques qui ont été utilisées.

1. Description d'un échantillon

1.1. Vocabulaire

> *Population et échantillon*

La notion fondamentale en statistique est celle de groupe ou d'ensemble d'objets équivalents que l'on appelle *population*. Ce terme est hérité des premières applications de la statistique à des études de démographie. Une population est un ensemble d'objets à étudier ayant des propriétés communes. La statistique traite des propriétés des populations plus que celles des individus particuliers. L'étude de tous les individus d'une population finie s'appelle un recensement. Mais, généralement la population à étudier est trop vaste pour pouvoir être observée entièrement, ainsi lorsque l'on observe qu'une partie de la population, la partie étudiée s'appelle *échantillon*. Un échantillon sera dit exhaustif s'il est de la même taille que la population. En hydrologie, les populations sont généralement infinies, les échantillons ne sont donc jamais exhaustifs.

> *Individus et variables*

Les divers objets étudiés dans une population sont des unités statistiques appelées *individus*. Chaque individu d'une population est décrit par un ensemble de caractéristiques appelées variables.

On appelle *variable aléatoire* (ou variate) le caractère numérique qui distingue chaque individu de l'échantillon.

> *Quantitative/qualitative*

Ces variables sont de nature soit *quantitative* (ou numérique) telles que la taille, le poids, la hauteur..., et s'expriment par des nombres réels sur lesquels des opérations arithmétiques ont un sens, soit *qualitative* et s'expriment par l'appartenance à une catégorie d'un ensemble fini.

> *Discrète/continue*

Une variable statistique est dite *discrète* lorsque ses valeurs possibles sont des nombres isolés. Dans le cas le plus fréquent, ce sont des nombres entiers : par exemple le nombre de défauts d'une pièce. Autrement la variable est dite *continue* si toutes les valeurs sont réelles et comprises dans un intervalle donné.

Dans ce travail, nous nous intéresserons à des échantillons de population de pluie, de temps sec et de pollution composés respectivement de 990 individus pour les deux premières et 38 individus pour la dernière. Les variables retenues pour décrire les individus ont été présentées au paragraphe 3.2 du chapitre II et sont des **variables numériques continues**.

1.2. Caractéristiques d'un échantillon

Un échantillon se décrit par un certain nombre de valeurs caractéristiques dont les principales sont :

⇒ la **moyenne arithmétique** d'un échantillon de n valeurs qui est :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

⇒ la **variance s^2** et l'**écart type s** qui sont définis comme suit :

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad \text{et} \quad s = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)^{1/2}$$

⇒ la valeur maximale et la valeur minimale qui donnent une indication sur l'étendue de la dispersion de l'échantillon.

⇒ les trois quartiles, Q_1 , Q_2 et Q_3 définis par $F(Q_1)=0,25$; $F(Q_2)=0,50$; $F(Q_3)=0,75$.

Le diagramme en boîte ou *box-plot* représente schématiquement les principales caractéristiques d'une variable numérique en utilisant les quartiles. La partie centrale de la distribution est représentée par une boîte de largeur arbitraire et dont la longueur correspond à l'intervalle inter quartile Q_3-Q_1 . On trace à l'intérieur la position de la médiane (Q_2). La boîte est alors complétée par des "moustaches" correspondant aux valeurs adjacentes :

- adjacente supérieure ⇒ la plus grande valeur inférieure à : $Q_3 + 1,5 (Q_3 - Q_1)$
- adjacente inférieure ⇒ la plus petite valeur supérieure à : $Q_1 - 1,5 (Q_1 - Q_3)$

2. L'Analyse en Composantes Principales (A.C.P.)

Philippeau (1986)] définit l'Analyse en Composantes Principales comme une méthode statistique essentiellement descriptive. Son objectif est de présenter, sous une forme graphique, le maximum de l'information contenue dans un tableau de données.

Ce tableau doit être constitué, en ligne, par des individus sur lesquels sont mesurées des variables quantitatives disposées en colonnes. Le choix des individus (lignes) et des variables (colonnes) n'est pas neutre dans les résultats de l'A.C.P., c'est une phase essentielle. Ce choix doit être en accord avec les objectifs de l'étude (Philippeau, 1986).

Disposant d'un tableau de p variables et n individus, il est impossible de voir des tendances dans un tel espace. Le but de l'A.C.P. est de trouver un espace de dimensions plus petites dans lequel il sera possible de mieux observer les individus.

L'analyse en composantes principales permet donc d'étudier les variations simultanées de variables interdépendantes.

Pour un nombre de variables donné, le calcul des composantes principales, combinaisons linéaires non corrélées entre-elles des individus observés, fournit des indications permettant de distinguer ces variables. On constate souvent que les 2 ou 3 premières composantes expliquent 90 à 95% de la variance totale. On pourra dans ce cas représenter les observations dans un système de deux axes orthogonaux.

Certaines spécificités ou certaines associations de variables peuvent alors être mises en évidence.

Dans une A.C.P., deux autres possibilités intéressantes sont offertes. Il s'agit de l'introduction d'*individus* ou de *variables "supplémentaires"*. En effet, lorsque l'on voudra comparer le comportement d'un individu par rapport à un échantillon on introduira cet individu dans l'A.C.P. en "individu supplémentaire". De la même manière, si l'on veut comparer et expliquer les variations d'une variable par rapport à un ensemble d'autres variables il faut l'introduire en "variable supplémentaire".

De façon à donner la même importance aux divers variables, l'analyse sera réalisée systématiquement sur des données centrées-réduites (c'est à dire à partir de la "matrice des corrélations")

3. Ajustement de loi

3.1. Loi de probabilité

Lorsqu'un phénomène quelconque est représenté ou décrit par une série d'individus, la fréquence d'observation d'un individu est la relation entre le nombre de fois qu'elle apparaît et le nombre total d'individus qui permettent de définir de façon quasi exhaustive ce phénomène étudié.

La fréquence cumulative s'appelle aussi probabilité de non-dépassement.

Considérant une variable aléatoire X dont l'intervalle de définition est $[x_a, x_b]$, on appelle fonction de répartition $G(x)$ la probabilité que X soit inférieur ou égal à x .

$$G(x) = \text{Prob}(X \leq x)$$

$G(x)$ est comprise entre 0 et 1 lorsque x décrit l'intervalle $[x_a, x_b]$.

Une loi de probabilité se définit d'une part par sa formulation mathématique, ce qui distingue les différents types de lois, et d'autre part, par des paramètres qui entrent dans la formulation mathématique et qui sont estimés d'après l'échantillon observé.

La détermination de ces paramètres se fait généralement suivant deux méthodes : la méthode dite *des moments* et la méthode *du maximum de vraisemblance*.

En hydrologie, on se limite à l'emploi de cinq à six types de lois qui ne dépendent pas de plus de trois paramètres.

Dans cette étude, les principales lois testées ont été les lois de Fuller et les lois de Weibull. Elles ont été ajustées au moyen d'HYDROLAB, ensemble de macro-commandes développées sur Excel par J-P LABORDE, qui utilise la méthode du maximum de vraisemblance. Une critique visuelle des résultats a conduit, parfois, à de petites modifications des paramètres.

3.2. Tests d'ajustement

Lorsque l'on étudie un échantillon d'une population, on choisit la formulation mathématique de la loi de probabilité qu'on souhaite ajuster et on calcule les paramètres numériques de cette loi.

Il est alors normal de se demander si cette loi est bien représentative de l'échantillon. On va donc déterminer la probabilité pour que cette hypothèse soit vérifiée, en considérant que l'on court deux risques (Laborde, 1987) :

⇒ un risque de première espèce qui consiste à rejeter à tort l'hypothèse alors qu'elle est vraie. La probabilité de ce risque est appelée *niveau de signification* à α %. Elle est définie par la valeur numérique du test, α étant toujours défini comme probabilité au dépassement de cette valeur numérique,

⇒ un risque de seconde espèce qui est d'accepter à tort l'hypothèse alors qu'elle est fausse. La probabilité de ce risque définit la puissance du test.

Les principaux tests utilisés sont les suivants :

⇒ test du χ^2 de Pearson,

⇒ test du Wn^2 d'Anderson,

⇒ test des suites.

Les tests du χ^2 et du Wn^2 sont relativement compliqués et leur puissance est discutable.

Aussi les ajustements de lois ont été testés au moyen du test des suites dont le principe est le suivant (CTGREF, 1978) : on appelle suite un ensemble de valeurs observées consécutives (après classement) telles qu'elles soient toutes soit en dessous, soit au-dessus de la loi et que les valeurs les plus proches possèdent la propriété contraire. On recherche le nombre de suites M_1 . Dans ce cas, ce sont les lois qui conduisent à des valeurs trop faibles de M_1 qui sont rejetées.

Les lois seront donc rejetées lorsque $M_1 < M$ avec $M = 0,61 N^{0,5}$ pour un seuil de 10%, où N est la taille de l'échantillon.

3.3. Période de retour

Les échantillons étudiés sont tous constitués de plus d'une valeur par an. Ainsi la fréquence théorique au non dépassement $G(x)$ obtenue après ajustement des lois ne conduit pas directement à la période de retour, une correction doit être apportée.

Soit un échantillon constitué de n individus représentant N années d'observation, la période de retour T sera obtenue en appliquant les corrections suivantes (CTGREF, 1979; CTGREF, 1980) :

$$T = \frac{N}{n} \frac{1}{1 - G(x)}$$

4. Critères d'évaluation d'une liaison entre deux séries

Les critères d'évaluation, décrits ci-dessous, servent à évaluer la liaison entre deux séries de valeurs. Dans ce qui suit, il s'agit des valeurs observées comparées aux valeurs prédites par un modèle.

La force et l'adéquation d'un modèle seront évaluées au moyen des trois critères suivants :

> Coefficient de corrélation

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(y'_i - \bar{y}') (y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [(y'_i - \bar{y}')^2] * \sum_{i=1}^n [(y_i - \bar{y})^2]}}$$

Rappelons que $-1 < r < 1$ et que plus $|r|$ est voisin de 1 meilleure est la corrélation.

> Coefficient de détermination

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [(y_i - \bar{y})^2] - \sum_{i=1}^n [(y_i - y'_i)^2]}{\sum_{i=1}^n [(y_i - \bar{y})^2]}$$

On obtient ainsi le pourcentage de la variance expliquée par le modèle par rapport à la variance totale.

R^2 doit être compris dans la fourchette $0 < R^2 < 1$ et la variance expliquée par le modèle est d'autant plus grande que R^2 est voisin de 1.

> Somme des carrés des écarts

$$e^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [(y_i - y'_i)^2]}{n}$$

La somme du carré des écarts, divisée par le nombre d'observations, permet de comparer quel que soit l'échantillon, l'écart résiduel entre les valeurs observées et celles obtenues par le modèle.

Dans ces trois expressions :

y_i : désigne la valeur observée

y'_i : désigne la valeur calculée

\bar{y} : désigne la moyenne des valeurs observées

\bar{y}' : désigne la moyenne des valeurs calculées

n : le nombre d'individus

A l'aide de ces trois paramètres, il sera possible de juger de la pertinence d'un modèle et de comparer des modèles entre-eux.

5 Rappel des principes de la régression linéaire multiple

Lorsque l'on cherche à expliquer une variable, MES tot par exemple, par un certain nombre d'autres variables (TS, durée, Imoy ...), on écrira une équation de régressions multiples simples du type: $Y' = a_i X_i + b$, avec Y' paramètres de pollution calculés, X_i paramètres de pluies, a_i et b coefficients de régression et terme constant. MES tot sera donc la variable expliquée et TS, durée, Imoy ... les variables explicatives.

L'objectif est de déterminer les paramètres a_j et b de telle façon à ce que Y' soit le plus proche possible de Y . La technique adoptée dans l'étude suivante est celle des régressions pas à pas régressive qui permet de supprimer au fur et à mesure les variables les moins significatives jusqu'à ce qu'il ne reste plus que des variables significatives. La démarche consiste à considérer l'ensemble des variables, à effectuer un test pour identifier la variable qui affecte le moins le coefficient de corrélation tout en vérifiant qu'il ne s'agit pas d'une variable significative et à la supprimer avant de recommencer le calcul.

L'élimination d'une variable a été testée au moyen du coefficient de corrélation partiel de la variable X_j avec Y et du ratio F défini comme suit :

$$F = \frac{\text{variation supplémentaire expliquée par la variable}}{\text{variation restée inexpliquée après suppression de la variable}}$$

Ainsi F suit une loi de Fischer, lorsque l'hypothèse nulle "corrélation nulle" est vérifiée, la variable explicative est rejetée ou acceptée au seuil de 5% ($n-2$ degrés de liberté) par le programme utilisé dans ce travail (Programme de régression écrit par J-P Laborde).

6. Les méthodes de rééchantillonnage

Dans le cadre d'une étude statistique de stabilité des, afin de pallier au manque de données, il est souvent possible de procéder à un rééchantillonnage des valeurs. Ce sont des méthodes de calculs intensifs qui reposent sur des techniques de simulations d'échantillons à partir d'un échantillon donné. Rendues possibles par la puissance de calcul des ordinateurs, ces techniques sont les seules possibles lorsque la complexité analytique du problème ne permet pas de résolution classique. Elles consistent à répéter des analyses sur les différents échantillons simulés puis à étudier les fluctuations des résultats obtenus. Plusieurs méthodes de validation (Jacknife, Bootstrap, validation croisée...) permettent d'engendrer, de façons différentes les échantillons artificiels. Nous ne présenterons que le Jacknife, car c'est de cette méthode que nous nous sommes inspirée pour la détermination des bornes de variation de certains paramètres des divers modèles.

Le "Jacknife" est une technique qui a été proposée par Quenouille et reprise par Tukey puis décrite de façon complète par Miller en 1974. Elle consiste à supprimer de l'échantillon de base une seule observation, ce qui rejoint le principe d'échantillonnage de la validation croisée. Si n est la taille de l'échantillon, on construit ainsi n échantillons de taille $n-1$.

Soit T , l'estimation de la valeur d'un paramètre, calculé sur l'échantillon de taille n .

On note T_{-j} l'estimateur calculé sur l'échantillon de taille $(n-1)$ obtenu en enlevant l'observation i et on appelle pseudo-valeur T^*_j :

$$T^*_j = n T - (n-1) T_{-j}$$

L'estimateur "Jacknife" est alors la moyenne des pseudo-valeurs :

$$J = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T^*_i$$

Dans cette étude nous nous sommes servis de cette technique non pas pour déterminer cette dernière valeur, mais pour déterminer les bornes de variations des paramètres, estimées à partir des valeurs extrêmes des différents T_{-j} .

ANNEXE III.2 - A.C.P. sur les moyennes et écarts-types mensuels des variables de pluviométrie

mois	nb valeur	m durée	ET durée	m Htot	ET Htot	m TS	ET TS	m lmoy	ET lmoy	m P60	ET P60	m P20	ET P20	m P5	ET P5
1	55	5,996	7,071	3,000	3,265	6,421	8,587	1,619	2,391	1,094	0,770	2,075	1,254	3,690	3,130
2	71	6,909	7,844	3,511	3,890	4,895	6,590	1,227	1,742	1,255	1,404	2,170	1,401	3,304	2,629
3	73	6,761	8,350	3,211	3,494	4,774	6,326	1,008	1,029	1,416	1,137	2,509	1,468	4,018	3,277
4	77	8,316	10,459	5,614	8,733	4,009	4,143	1,513	2,120	1,829	1,374	3,447	3,299	5,756	3,299
5	105	6,476	6,721	5,159	5,934	2,707	3,314	1,662	2,863	2,215	2,077	4,366	3,937	7,533	3,937
6	111	6,313	7,099	6,967	8,612	2,343	2,747	1,810	1,564	2,984	3,040	6,200	6,920	10,002	11,610
7	108	3,884	5,429	4,733	6,180	2,783	4,046	3,413	4,736	3,059	4,370	6,413	8,864	10,839	8,864
8	101	5,489	8,312	5,544	6,427	2,872	3,163	2,645	4,541	3,233	3,650	7,084	8,828	11,473	13,556
9	85	5,083	5,208	5,789	6,456	3,146	3,612	2,321	3,291	3,119	4,277	6,094	7,488	9,889	11,400
10	75	6,638	7,577	4,074	5,604	3,622	6,108	1,218	1,314	1,540	1,227	2,956	2,237	4,450	3,438
11	72	7,997	9,428	6,419	7,484	4,126	4,772	1,265	1,063	2,085	1,372	3,551	2,413	5,235	4,643
12	58	7,418	9,067	3,645	4,443	3,979	5,278	1,331	1,701	1,326	1,106	2,330	1,705	3,447	14,237

Caractéristiques de l'Analyse en Composantes Principales :

15 variables actives

0 variables supplémentaires

12 observations actives

0 observations supplémentaires

3 premières composantes principales étudiées

Moyennes des observations actives :

82,583 6,440 7,714 4,806 5,877 3,807 4,890 1,753 2,363 2,096 2,150 4,100 4,151 6,636 7,002

Écarts-types des observations actives :

19,289 1,234 1,549 1,312 1,847 1,163 1,738 0,707 1,264 0,810 1,319 1,864 3,007 3,135 4,560

Matrice des coefficients de corrélation :

	nb valeur	m durée	ET durée	m Htot	ET Htot	m TS	ET TS	m lmoy	ET lmoy	m P60	ET P60	m P20	ET P20	m P5	ET P5
nb valeur	1,000	-0,524	-0,452	0,632	0,563	-0,861	-0,817	0,650	0,558	0,841	0,766	0,858	0,820	0,871	0,340
m durée	-0,524	1,000	0,874	0,018	0,137	0,331	0,187	-0,837	-0,778	-0,599	-0,784	-0,643	-0,718	-0,673	-0,379
ET durée	-0,452	0,874	1,000	-0,002	0,160	0,296	0,130	-0,588	-0,513	-0,461	-0,649	-0,472	-0,515	-0,503	-0,200
m Htot	0,632	0,018	-0,002	1,000	0,928	-0,708	-0,836	0,314	0,160	0,752	0,526	0,699	0,602	0,667	0,363
ET Htot	0,563	0,137	0,160	0,928	1,000	-0,663	-0,780	0,273	0,120	0,628	0,408	0,588	0,519	0,566	0,249
m TS	-0,861	0,331	0,296	-0,708	-0,663	1,000	0,933	-0,521	-0,417	-0,814	-0,718	-0,804	-0,759	-0,786	-0,556
ET TS	-0,817	0,187	0,130	-0,836	-0,780	0,933	1,000	-0,495	-0,418	-0,843	-0,700	-0,818	-0,758	-0,802	-0,564
m lmoy	0,650	-0,837	-0,588	0,314	0,273	-0,521	-0,495	1,000	0,933	0,795	0,889	0,827	0,899	0,852	0,521
ET lmoy	0,558	-0,778	-0,513	0,160	0,120	-0,417	-0,418	0,933	1,000	0,678	0,785	0,725	0,800	0,762	0,442
m P60	0,841	-0,599	-0,461	0,752	0,628	-0,814	-0,843	0,795	0,678	1,000	0,939	0,991	0,968	0,982	0,615
ET P60	0,766	-0,784	-0,649	0,526	0,408	-0,718	-0,700	0,889	0,785	0,939	1,000	0,938	0,966	0,940	0,612
m P20	0,858	-0,643	-0,472	0,699	0,588	-0,804	-0,818	0,827	0,725	0,991	0,938	1,000	0,985	0,995	0,628
ET P20	0,820	-0,718	-0,515	0,602	0,519	-0,759	-0,758	0,899	0,800	0,968	0,966	0,985	1,000	0,987	0,644
m P5	0,871	-0,673	-0,503	0,667	0,566	-0,786	-0,802	0,852	0,762	0,982	0,940	0,995	0,987	1,000	0,595
ET P5	0,340	-0,379	-0,200	0,363	0,249	-0,556	-0,564	0,521	0,442	0,615	0,612	0,628	0,644	0,595	1,000

Valeurs propres :

C1	C 2	C 3
10,174	2,725	0,792

Variances expliquées :

C1	C 2	C 3
0,678	0,182	0,053

Variances cumulées :

C1	C 2	C 3
0,678	0,860	0,913

Projections des variables actives :

	C1	C 2	C 3
nb valeur	0,873	0,123	-0,330
m durée	-0,669	0,724	0,093
ET durée	-0,524	0,649	0,353
m Htot	0,673	0,667	-0,102
ET Htot	0,577	0,740	-0,107
m TS	-0,838	-0,336	0,063
ET TS	-0,833	-0,485	-0,025
m Imoy	0,857	-0,391	0,086
ET Imoy	0,752	-0,463	0,135
m P60	0,983	0,088	-0,001
ET P60	0,957	-0,200	0,013
m P20	0,989	0,032	0,019
ET P20	0,986	-0,085	0,066
m P5	0,989	-0,012	-0,016
ET P5	0,631	0,005	0,702

Projections des variables suppl_ementaires :

C1	C 2	C 3
----	-----	-----

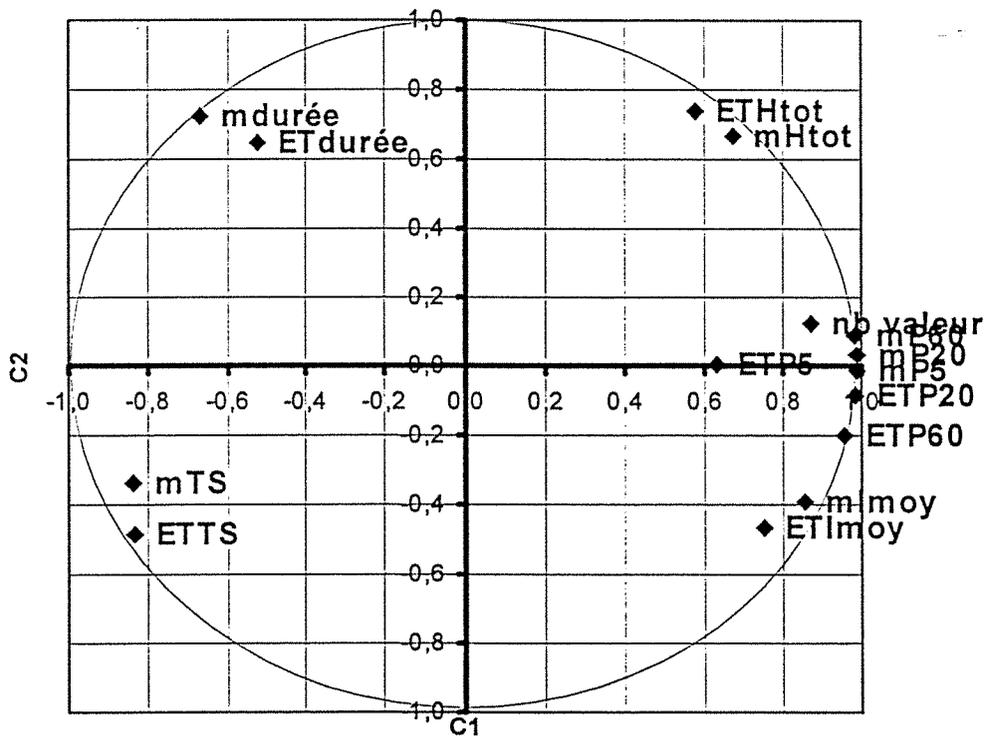
Projections des observations actives

	C1	C 2	C 3
1	-1,183	-1,555	-0,023
2	-0,969	-0,511	-0,454
3	-0,992	-0,372	-0,316
4	-0,336	1,557	0,004
5	0,323	0,221	-1,404
6	1,046	1,187	-0,387
7	1,481	-1,398	-0,425
8	1,336	-0,122	1,396
9	1,108	-0,546	0,126
10	-0,624	0,016	-0,780
11	-0,424	1,422	-0,145
12	-0,766	0,100	2,408

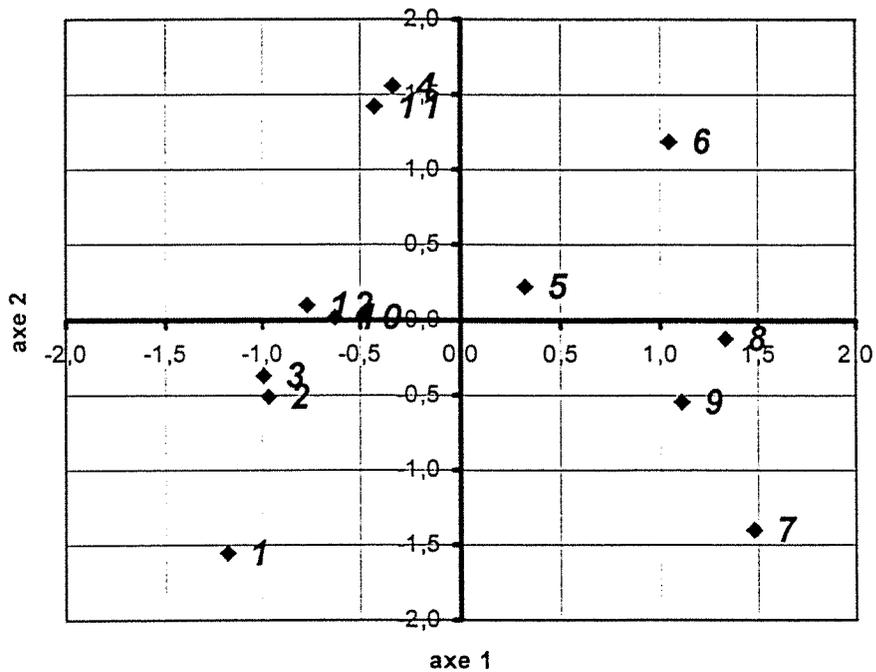
Projections des observations supplémentaires :

C1	C 2	C 3
----	-----	-----

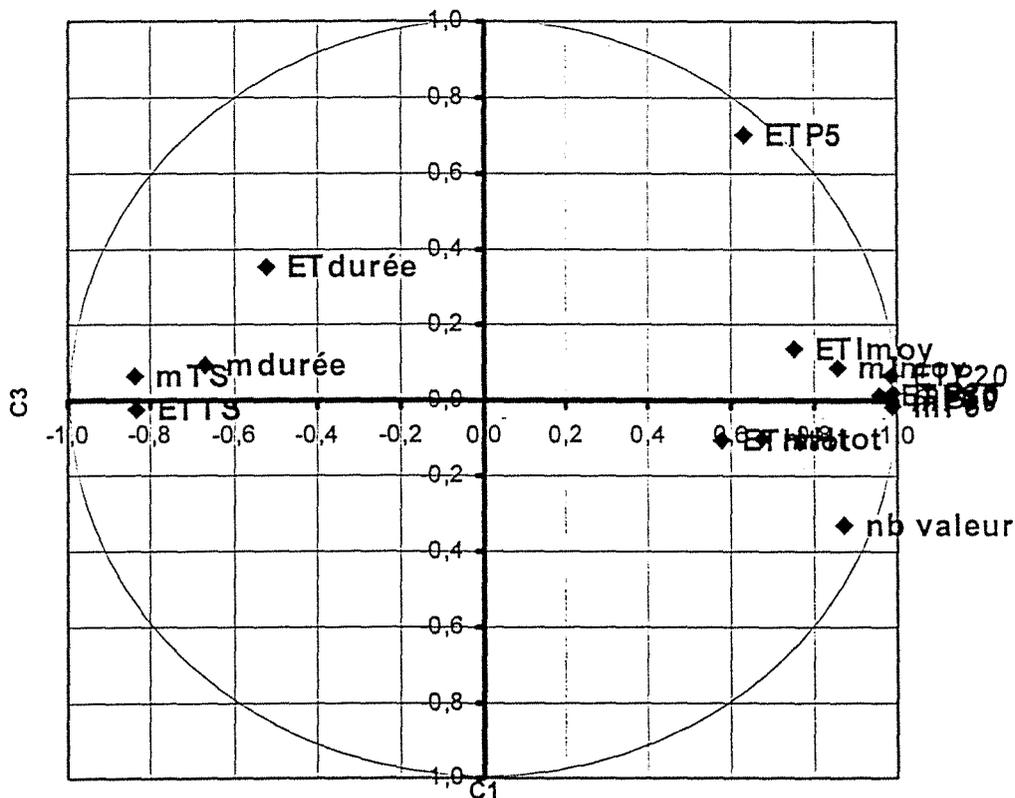
A.C.P. sur les moyennes et écarts-types mensuels
des variables de pluviométrie
Plan C1-C2



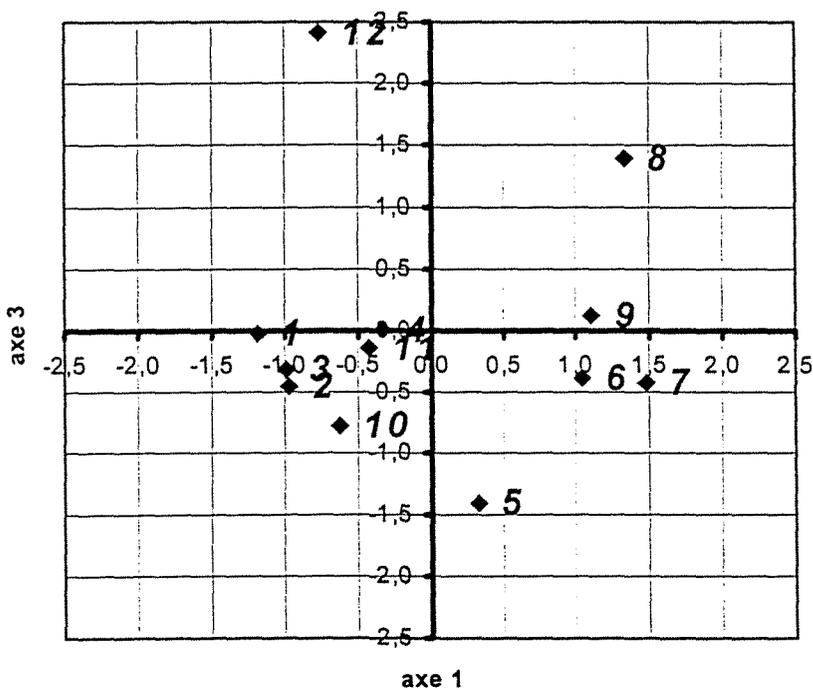
A.C.P. sur les moyennes et écarts-types mensuels
des variables de pluviométrie
axes 1-2



A.C.P. sur les moyennes et écarts-types mensuels
des variables de pluviométrie
Plan C1-C3



A.C.P. sur les moyennes et écarts-types mensuels
des variables de pluviométrie
axes 1-3



ANNEXE III 3.1 - A.C.P. sur les variables de pluviométrie d'hiver

Caractéristiques de l'Analyse en Composantes Principales :

6 variables actives

1 variables supplémentaires

481 observations actives

0 observations supplémentaires

3 premières composantes principales étudiées

Moyennes des observations actives :

7,294	4,341	4,301	1,549	2,775	4,290	1,256
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Ecart-types des observations actives :

8,715	5,888	5,713	1,204	2,199	3,942	1,568
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Matrice des coefficients de corrélation :

	Durée	Htot	TS préc	sur 60 min	sur 20 min	sur 5 min	Imoy
Durée	1,00	0,70	0,00	0,40	0,26	0,16	-0,35
Htot	0,70	1,00	0,05	0,64	0,47	0,30	-0,08
TS préc	0,00	0,05	1,00	-0,03	-0,07	-0,07	0,02
sur 60 min	0,40	0,64	-0,03	1,00	0,84	0,59	0,04
sur 20 min	0,26	0,47	-0,07	0,84	1,00	0,83	0,21
sur 5 min	0,16	0,30	-0,07	0,59	0,83	1,00	0,35
Imoy	-0,35	-0,08	0,02	0,04	0,21	0,35	1,00

Valeurs propres :

C1	C 2	C 3
3,128	1,231	0,974

Variances expliquées :

C1	C 2	C 3
0,521	0,205	0,162

Variances cumulées :

C1	C 2	C 3
0,521	0,726	0,889

Projections des variables actives :

	C1	C 2	C 3
Durée	0,587	0,662	-0,271
Htot	0,767	0,512	-0,102
TS préc	-0,046	0,388	0,920
sur 60 min	0,906	-0,077	0,051
sur 20 min	0,896	-0,361	0,125
sur 5 min	0,754	-0,493	0,161

Projections des variables suppl_mentaires :

	C1	C 2	C 3
Imoy	0,068	-0,424	0,213

Projections des observations actives

	C1	C2	C3		C1	C2	C3		C1	C2	C3		C1	C2	C3
1	-0,32	1,20	0,09	43	-0,56	0,63	-0,96	85	-0,74	0,01	-0,04	127	-0,80	0,41	0,85
2	-0,78	0,08	0,93	44	-1,07	-0,29	-0,51	86	-1,20	-0,09	-0,26	128	-0,43	0,30	0,02
3	-0,37	-0,71	-0,37	45	-0,65	0,02	-0,53	87	-0,21	1,00	1,33	129	-0,40	-0,29	0,03
4	-0,61	0,09	-0,13	46	-0,97	-0,41	0,00	88	-0,44	0,97	-0,24	130	-0,33	-0,10	-0,53
5	-0,30	0,22	0,15	47	0,45	0,48	-0,69	89	0,03	-0,85	-0,35	131	0,50	-0,30	-0,42
6	0,97	2,03	1,81	48	0,05	0,66	-1,01	90	-0,90	-0,08	-0,63	132	0,12	-0,42	-0,10
7	-0,69	-0,30	-0,60	49	-0,31	-1,20	0,44	91	-0,40	-0,70	-0,38	133	-0,02	0,47	1,38
8	-0,16	-0,21	-0,19	50	-0,36	-0,58	-0,47	92	-0,99	0,15	1,01	134	-0,41	-0,06	-0,71
9	-0,53	-0,28	-0,63	51	1,00	-2,04	1,44	93	-1,15	0,18	0,67	135	0,10	1,44	-1,42
10	0,18	1,06	-1,13	52	1,13	0,78	1,37	94	-0,05	0,03	-0,38	136	-0,14	0,90	-0,91
11	0,19	-0,10	0,15	53	-0,94	-0,44	-0,52	95	-0,04	1,14	-1,28	137	0,58	2,00	-0,72
12	-0,82	0,11	0,51	54	0,29	-1,00	-0,19	96	0,77	2,24	1,56	138	-0,68	0,28	-0,54
13	-0,78	0,06	-0,42	55	-0,69	-0,37	-0,33	97	-0,88	-0,08	-0,69	139	-1,05	-0,04	0,21
14	-0,48	0,37	0,01	56	-0,55	0,02	-0,84	98	-0,51	-0,32	-0,20	140	1,56	1,23	2,16
15	-0,89	1,54	4,52	57	0,14	-1,08	-0,29	99	-0,77	0,39	0,83	141	-0,57	-0,49	-0,53
16	0,85	-1,35	0,49	58	-0,39	-0,15	-0,19	100	-0,61	0,00	-0,20	142	0,66	-0,63	-0,21
17	-0,37	0,01	-0,72	59	0,87	-0,09	-0,51	101	-1,02	-0,26	-0,59	143	-0,79	0,08	0,46
18	-0,34	1,13	4,78	60	-0,57	0,14	0,24	102	-1,19	-0,19	-0,59	144	-0,09	-0,38	-0,13
19	-0,43	2,75	4,92	61	-0,67	0,06	-0,50	103	-0,09	-0,48	-0,47	145	1,17	1,16	-1,38
20	-0,80	0,09	0,22	62	0,55	1,47	-1,05	104	-0,86	0,09	1,29	146	-0,42	-0,74	0,37
21	-0,67	0,61	0,76	63	-0,35	0,17	-0,14	105	-0,85	-0,12	-0,61	147	-0,76	0,04	0,45
22	-0,96	0,50	1,55	64	-0,65	0,45	-0,02	106	0,42	0,42	0,04	148	-0,64	0,38	-0,03
23	-0,20	-0,15	-0,44	65	-0,60	-0,10	-0,21	107	0,17	0,38	1,98	149	-0,51	-0,04	-0,13
24	-0,43	-0,69	-0,05	66	-0,61	-0,30	-0,51	108	-0,71	-0,15	0,03	150	-1,04	-0,32	-0,63
25	0,27	-0,30	0,74	67	0,91	2,31	0,61	109	-0,82	0,43	0,42	151	-0,31	0,22	-0,48
26	-0,49	0,81	-1,13	68	0,35	1,60	-1,28	110	0,31	0,21	-0,71	152	2,47	1,14	-0,73
27	-1,20	-0,05	-0,15	69	-0,30	1,19	-0,98	111	1,04	0,01	-0,74	153	-0,80	1,23	2,50
28	-0,03	-0,10	-0,32	70	0,14	-0,25	-0,45	112	0,26	-0,08	-0,50	154	-0,21	1,42	-0,34
29	-1,02	0,12	0,93	71	0,60	-1,33	-0,12	113	0,64	1,14	-1,16	155	-0,85	0,19	2,10
30	1,08	0,86	-1,14	72	-0,27	0,39	-0,88	114	-0,97	-0,45	-0,14	156	0,94	0,46	-0,90
31	-0,53	0,57	-0,19	73	3,25	1,90	-1,19	115	-0,79	-0,13	-0,17	157	-0,15	-0,18	0,49
32	0,08	-1,45	0,05	74	0,55	0,29	-0,81	116	0,34	0,55	-0,47	158	-0,77	-0,15	0,09
33	-0,42	-0,10	-0,23	75	-0,74	-0,26	-0,27	117	-0,76	-0,31	-0,54	159	-0,36	0,58	-0,05
34	-0,90	-0,39	-0,51	76	-1,04	-0,33	-0,65	118	-0,55	-0,45	-0,24	160	-0,78	0,49	2,14
35	-0,82	-0,29	-0,63	77	-0,82	0,31	-0,01	119	0,57	-1,39	0,11	161	-0,63	-0,49	-0,40
36	-0,52	-1,06	-0,11	78	0,40	0,08	-0,68	120	1,39	-1,68	0,28	162	-0,77	-0,25	0,17
37	0,32	1,67	3,89	79	-0,07	-0,43	-0,23	121	-1,06	-0,33	-0,63	163	-0,33	-0,16	1,29
38	-0,82	-0,31	0,33	80	-0,35	0,18	-0,68	122	-0,17	0,91	-0,43	164	-0,56	0,34	-0,93
39	0,70	1,49	-1,25	81	-0,25	-0,54	-0,41	123	1,21	-0,89	0,49	165	-0,09	-0,25	-0,62
40	-0,23	1,14	2,72	82	-0,87	0,27	-0,60	124	-0,30	0,31	1,04	166	0,10	-0,77	-0,21
41	-0,99	-0,09	0,94	83	-1,01	0,57	1,93	125	0,33	1,29	-0,97	167	-0,34	-0,25	-0,60
42	-1,07	-0,19	-0,06	84	0,32	1,25	-0,69	126	-0,47	0,98	-0,46	168	1,00	-1,31	-0,24

Projections des observations actives (suite)

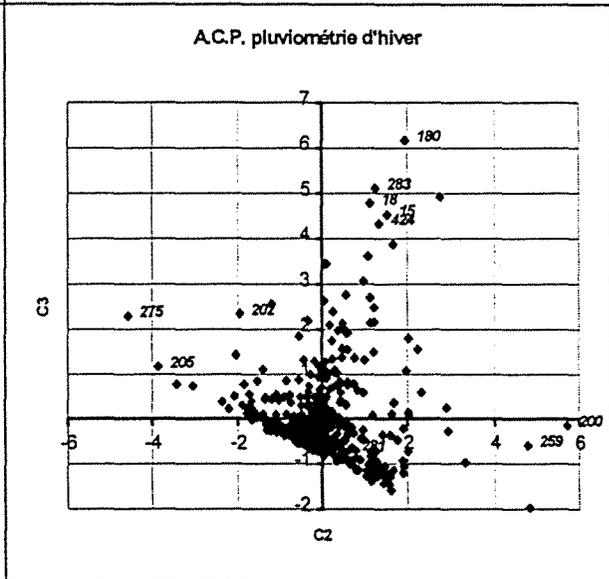
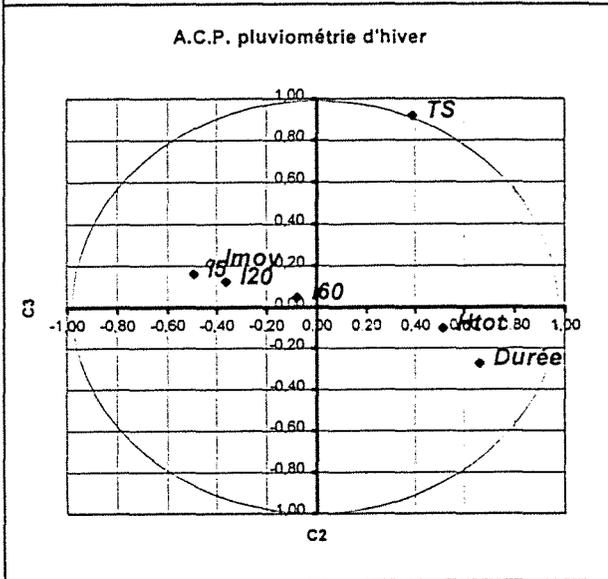
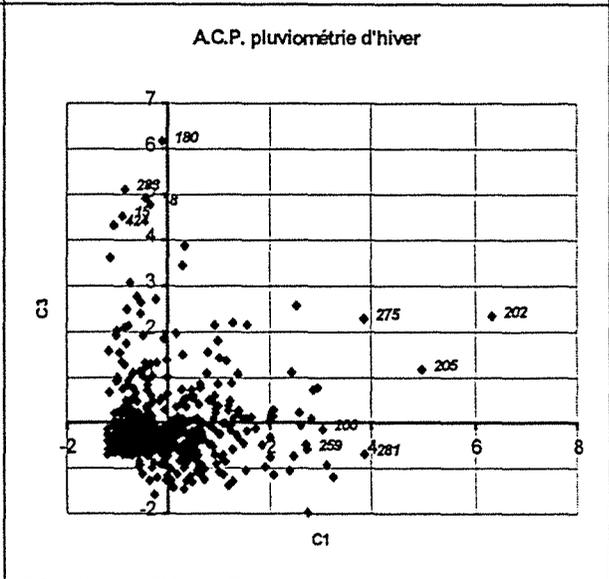
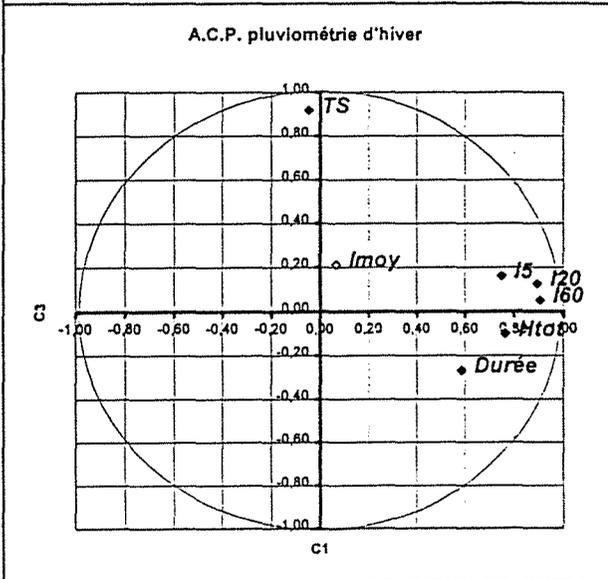
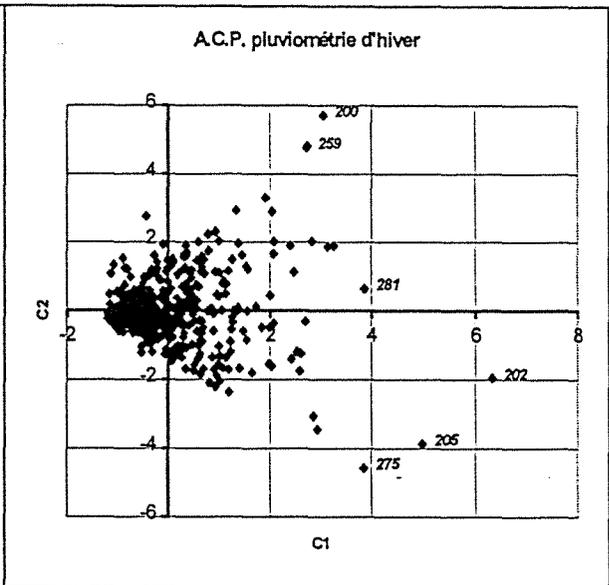
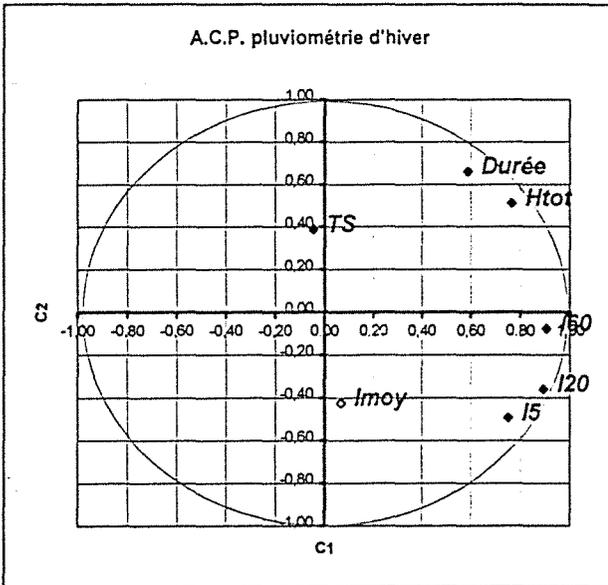
	C1	C2	C3												
169	1,26	1,49	-1,28	211	1,25	-0,16	-0,58	253	-0,57	-0,09	0,07	295	-0,35	1,04	-1,27
170	1,23	-0,55	0,88	212	2,74	4,81	-1,97	254	2,43	-1,39	1,12	296	-0,27	0,36	-0,32
171	-0,48	0,61	1,93	213	-0,27	-0,41	-0,43	255	-0,97	-0,58	-0,54	297	0,09	1,51	-1,39
172	-0,79	-0,29	-0,54	214	0,35	0,52	-0,80	256	0,75	-0,02	1,09	298	0,61	-0,85	0,86
173	-0,74	0,06	0,36	215	-0,39	-0,49	0,30	257	-0,48	-0,49	-0,17	299	-1,05	0,06	0,06
174	-0,44	-0,51	-0,54	216	1,36	0,08	-0,32	258	-0,70	-0,08	0,55	300	-1,07	-0,31	-0,41
175	0,18	-0,36	-0,59	217	0,66	1,60	-0,35	259	2,73	4,78	-0,59	301	0,99	1,11	-1,09
176	-0,70	0,43	-0,61	218	0,62	-1,85	0,78	260	0,35	-1,08	0,55	302	-0,66	-0,45	-0,53
177	0,17	-0,14	0,36	219	0,50	-1,57	0,07	261	0,18	-1,28	-0,04	303	0,38	0,34	-0,86
178	-0,62	-0,12	-0,35	220	1,06	-1,66	-0,02	262	-0,41	0,60	0,84	304	-0,45	-0,77	-0,36
179	-1,02	-0,28	-0,51	221	-1,04	-0,29	-0,53	263	1,64	-1,79	0,13	305	-0,94	-0,09	-0,46
180	-0,10	1,94	6,17	222	0,01	-0,18	-0,61	264	-0,01	-0,27	1,01	306	-0,88	-0,61	-0,20
181	-0,92	-0,08	-0,07	223	-0,97	-0,54	-0,40	265	0,40	-0,42	-0,44	307	-0,35	-0,99	-0,21
182	-0,13	-0,77	0,54	224	0,28	0,24	-0,71	266	-0,64	-0,13	0,08	308	-0,68	-0,24	-0,58
183	-0,30	-0,52	0,48	225	0,45	0,97	0,59	267	-0,87	-0,12	-0,54	309	-0,65	-0,18	-0,60
184	-1,06	-0,32	-0,61	226	-0,61	0,58	2,78	268	-0,62	-0,06	0,67	310	-0,98	-0,40	-0,61
185	0,30	-0,76	0,52	227	-0,09	0,58	-0,40	269	-1,04	-0,29	-0,53	311	-0,24	-0,67	-0,07
186	-0,24	0,08	-0,51	228	-1,20	-0,13	-0,40	270	0,00	0,84	0,65	312	1,21	-1,20	-0,16
187	-0,89	-0,09	0,33	229	-0,70	0,00	-0,71	271	-0,42	0,17	-0,62	313	-0,63	-0,32	-0,55
188	2,02	-1,58	0,15	230	0,92	-2,21	0,23	272	-0,29	-0,10	0,03	314	-0,04	-0,11	-0,71
189	-0,93	-0,01	0,23	231	1,36	0,02	0,26	273	-1,04	-0,31	-0,59	315	-1,19	-0,23	-0,69
190	-0,55	0,00	1,13	232	-0,50	-0,39	-0,56	274	-0,99	-0,25	-0,46	316	1,85	-0,48	-0,47
191	0,84	0,07	-0,48	233	1,24	-0,18	-0,03	275	3,86	-4,57	2,30	317	-1,03	-0,13	-0,27
192	-0,06	-1,27	-0,17	234	-0,97	-0,23	-0,55	276	0,68	-0,50	-0,34	318	-0,05	0,07	-0,78
193	2,07	-0,35	0,29	235	0,80	-2,09	0,51	277	0,90	-0,04	-0,69	319	-0,89	0,31	-0,37
194	-0,57	-0,46	-0,57	236	-0,01	1,46	-1,15	278	-0,54	-0,25	-0,48	320	0,01	-0,63	-0,25
195	-0,74	-0,41	-0,37	237	-0,05	0,33	-0,93	279	0,20	0,18	0,13	321	2,00	-0,48	-0,32
196	-0,30	-0,90	-0,37	238	-0,15	-0,39	-0,17	280	-0,85	0,08	-0,06	322	0,47	-0,98	-0,18
197	0,88	-1,71	0,10	239	0,34	1,90	-0,21	281	3,86	0,65	-0,67	323	0,34	0,79	-0,86
198	-0,43	-0,92	-0,18	240	-0,10	-0,70	-0,22	282	-0,81	0,24	1,75	324	0,47	-0,11	-0,35
199	-0,58	-0,65	-0,49	241	-0,72	0,03	-0,32	283	-0,85	1,25	5,12	325	1,47	-0,58	-0,44
200	3,05	5,72	-0,13	242	-0,91	-0,26	0,02	284	-0,64	-0,34	-0,49	326	0,07	-0,56	-0,50
201	0,49	-0,33	0,62	243	-0,17	-0,28	-0,61	285	0,61	-1,25	-0,14	327	-0,97	-0,37	-0,54
202	6,32	-1,95	2,35	244	0,97	-1,54	0,86	286	-0,01	-1,18	-0,14	328	0,68	-1,69	0,00
203	0,31	1,57	-1,45	245	-0,14	0,37	-0,52	287	-0,29	-0,87	-0,28	329	0,46	1,19	-1,29
204	0,00	0,53	-0,74	246	1,18	-2,37	0,39	288	-0,64	-0,26	-0,47	330	0,98	-1,04	-0,24
205	4,98	-3,85	1,18	247	-0,53	0,06	2,65	289	0,29	1,22	1,51	331	-0,04	-1,13	-0,12
206	0,43	1,08	-1,17	248	0,46	0,27	0,73	290	-1,07	-0,21	-0,26	332	-0,40	0,09	0,94
207	-0,70	0,11	1,07	249	0,06	-1,20	-0,16	291	-0,07	-0,55	1,85	333	-0,61	-0,10	-0,65
208	-0,68	-0,66	0,07	250	-1,07	-0,23	-0,34	292	-0,15	-0,18	-0,60	334	-0,40	-0,25	0,20
209	-0,06	-0,49	0,29	251	-0,35	0,32	-0,62	293	2,71	-0,31	-0,47	335	-0,18	-0,15	-0,24
210	0,65	1,27	-0,93	252	0,27	0,71	-0,19	294	-1,13	1,09	3,62	336	0,05	0,12	-0,41

Projections des observations actives (suite)

	C1	C2	C3												
337	-0,70	-0,18	-0,52	379	0,55	-0,60	-0,42	421	0,54	0,07	-0,61	463	-1,15	-0,27	-0,45
338	1,91	3,31	-0,96	380	-0,79	-0,22	-0,33	422	0,80	0,04	-0,05	464	0,20	-1,13	-0,10
339	-0,40	0,18	-0,62	381	0,66	-0,89	-0,31	423	1,55	-0,01	-0,17	465	-0,26	1,60	-1,58
340	-1,16	0,48	1,58	382	-1,19	-0,19	-0,58	424	-1,06	1,35	4,33	466	-0,11	0,47	-0,49
341	0,09	0,07	-0,46	383	-1,07	-0,31	-0,43	425	-0,45	-0,42	1,32	467	-0,94	0,61	1,55
342	0,29	0,10	3,46	384	-0,75	-0,21	-0,61	426	-0,19	-0,34	-0,45	468	0,59	0,71	-0,93
343	0,47	-0,99	-0,21	385	-0,91	0,08	0,19	427	-0,77	-0,16	-0,58	469	-0,88	-0,36	-0,48
344	-0,66	-0,12	0,25	386	1,26	-0,32	2,21	428	1,54	-0,84	0,11	470	-0,02	1,26	-0,72
345	-0,25	-0,11	-0,38	387	0,98	0,43	0,38	429	-0,48	-0,72	-0,24	471	-0,93	-0,51	-0,52
346	-0,91	0,25	1,35	388	2,61	-1,24	-0,05	430	-0,24	-0,76	-0,37	472	-0,78	-0,29	-0,58
347	-0,19	-0,78	-0,17	389	0,15	-1,20	-0,13	431	-0,40	0,00	0,73	473	-0,70	-0,59	-0,23
348	2,86	-3,06	0,74	390	-0,32	0,43	0,61	432	1,33	2,94	-0,26	474	1,36	1,97	1,08
349	0,70	1,08	-1,01	391	-0,41	0,22	-0,18	433	0,36	1,69	0,37	475	-1,06	-0,30	-0,56
350	0,88	-0,59	-0,12	392	-0,91	1,13	-2,15	434	-0,20	1,24	-1,21	476	0,42	0,36	-0,55
351	-1,00	-0,13	-0,10	393	-0,80	-0,40	0,02	435	0,06	1,30	-1,27	477	-0,90	0,34	0,76
352	1,26	0,00	0,11	394	0,34	-1,68	0,40	436	-1,14	-0,32	-0,60	478	-0,33	-0,01	-0,61
353	2,08	1,67	-1,13	395	-1,06	-0,44	-0,55	437	-0,52	-1,21	-0,26	479	0,33	0,26	-0,78
354	-0,77	-0,15	-0,58	396	0,31	-0,66	-0,44	438	-0,79	-0,31	-0,44	480	-0,55	-0,35	-0,22
355	-0,69	0,30	1,12	397	0,59	-1,02	-0,10	439	-1,00	0,51	2,03	481	0,04	-0,37	-0,10
356	1,06	0,80	-0,70	398	-0,50	0,23	-0,49	440	-0,53	-0,21	-0,60				
357	-0,12	-0,16	-0,69	399	2,53	-1,19	2,57	441	-0,82	0,46	0,81				
358	2,93	-3,43	0,78	400	-0,70	0,09	0,14	442	-0,85	0,75	0,79				
359	0,29	-1,09	0,10	401	-0,61	0,26	0,17	443	-0,78	-0,25	-0,58				
360	0,27	-1,35	0,45	402	-0,01	-0,31	-0,53	444	-0,08	0,27	-0,43				
361	-0,99	0,10	0,25	403	1,52	1,31	-1,04	445	-0,20	-0,84	-0,22				
362	0,22	1,13	-0,83	404	-0,29	-0,12	-0,63	446	0,43	0,61	-0,32				
363	-0,54	0,26	2,41	405	0,30	0,69	-0,99	447	-0,58	0,35	0,04				
364	0,49	-1,73	0,56	406	2,01	0,45	-0,76	448	0,93	-1,88	0,31				
365	-0,54	-0,47	0,12	407	2,07	2,02	0,15	449	2,59	-1,75	0,23				
366	-1,04	-0,31	-0,59	408	-0,64	0,06	-0,25	450	0,54	0,75	-0,31				
367	-1,13	-0,26	-0,64	409	-0,05	0,42	-0,17	451	0,20	-1,00	-0,25				
368	1,12	-1,37	0,00	410	-0,58	-0,02	-0,37	452	0,29	0,70	-0,64				
369	-0,46	-0,09	1,20	411	-0,10	0,58	-0,87	453	-0,92	-0,15	-0,15				
370	-0,74	0,98	3,08	412	0,61	-0,29	-0,34	454	0,79	1,75	-0,47				
371	-0,54	-0,03	-0,24	413	-0,63	-0,47	-0,45	455	-0,80	-0,17	-0,65				
372	2,82	2,03	0,10	414	-0,49	0,36	1,03	456	0,29	-0,45	-0,08				
373	-0,59	-0,29	-0,40	415	0,60	-1,03	0,43	457	-0,86	0,10	-0,25				
374	-0,79	-0,15	-0,69	416	1,17	-1,71	0,28	458	0,65	-0,31	-0,26				
375	-0,41	0,58	0,31	417	1,72	0,13	-0,11	459	-1,06	-0,35	-0,54				
376	2,05	2,90	0,26	418	1,44	1,63	0,12	460	-0,60	-0,37	0,48				
377	2,40	1,90	-1,05	419	2,03	-1,60	0,18	461	-1,04	-0,24	-0,47				
378	3,13	1,88	-0,93	420	1,98	-1,55	0,04	462	1,11	0,50	-0,85				

Projections des observations supplémentaires :

	C1	C2	C3
--	----	----	----



ANNEXE III 3.2 - A.C.P. sur les variables de pluviométrie d'été

Caractéristiques de l'Analyse en Composantes Principales :

- 6 variables actives
- 1 variables supplémentaires
- 510 observations actives
- 0 observations supplémentaires
- 3 premières composantes principales étudiées

Moyennes des observations actives :

5,464	5,644	2,750	2,913	6,025	9,943	2,370
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Ecart-types des observations actives :

6,729	6,845	3,391	3,558	7,445	12,422	3,630
-------	-------	-------	-------	-------	--------	-------

Matrice des coefficients de corrélation :

	Durée	Htot	TS préc	sur 60 min	sur 20 min	sur 5 min	lmoy
Durée	1,00	0,62	-0,02	0,31	0,31	0,26	-0,30
Htot	0,62	1,00	0,03	0,77	0,71	0,62	0,08
TS préc	-0,02	0,03	1,00	0,02	0,01	0,04	0,03
sur 60 min	0,31	0,77	0,02	1,00	0,93	0,79	0,26
sur 20 min	0,31	0,71	0,01	0,93	1,00	0,88	0,27
sur 5 min	0,26	0,62	0,04	0,79	0,88	1,00	0,32
lmoy	-0,30	0,08	0,03	0,26	0,27	0,32	1,00

Valeurs propres :

C1	C 2	C 3
3,571	1,010	0,945

Variances expliquées :

C1	C 2	C 3
0,595	0,168	0,157

Variances cumulées :

C1	C 2	C 3
0,595	0,763	0,921

Projections des variables

actives :

	C1	C 2	C 3
Durée	0,527	-0,321	0,754
Htot	0,877	-0,097	0,280
TS préc	0,034	0,935	0,350
sur 60 min	0,935	0,057	-0,198
sur 20 min	0,940	0,070	-0,247
sur 5 min	0,873	0,118	-0,274

Projections des variables suppl_mentaires :

	C1	C 2	C 3
lmoy	0,192	0,186	-0,418

Projections des observations actives

	C1	C2	C3		C1	C2	C3		C1	C2	C3		C1	C2	C3
1	-0,29	-1,12	1,21	43	0,73	-1,48	1,93	85	0,33	-0,80	0,81	127	-0,81	-0,34	-0,53
2	-0,08	-0,48	0,40	44	-0,30	1,80	0,72	86	-0,61	-0,13	0,06	128	-0,49	-0,29	-0,31
3	1,91	-1,17	0,98	45	-0,76	-0,39	-0,57	87	-0,81	1,62	0,20	129	0,38	-0,39	0,07
4	0,11	-0,97	0,62	46	0,99	-1,56	2,57	88	-0,45	-0,58	-0,05	130	-0,61	0,57	-0,23
5	-0,80	0,05	-0,35	47	-0,84	-0,29	-0,52	89	-0,84	-0,43	-0,58	131	0,25	1,11	1,38
6	0,19	-0,69	1,15	48	-0,57	-0,33	-0,04	90	-0,60	-0,46	-0,70	132	-0,74	-0,44	-0,41
7	-0,84	0,49	-0,13	49	1,92	0,01	-1,90	91	-0,84	-0,44	-0,58	133	-0,81	0,97	-0,06
8	0,24	0,65	0,95	50	-0,32	-0,39	-0,62	92	-0,33	-0,49	-0,24	134	0,61	0,48	-0,59
9	-0,01	0,34	1,07	51	-0,20	1,22	0,20	93	-0,31	-0,45	0,32	135	-0,80	-0,05	-0,32
10	0,14	-0,42	-0,67	52	-0,31	0,04	-0,13	94	-0,69	3,07	0,73	136	0,07	0,52	0,19
11	1,53	0,53	1,24	53	-0,22	-0,41	-0,72	95	-0,23	-0,38	-0,46	137	1,99	-1,42	2,38
12	-0,71	2,79	0,70	54	-0,07	-0,87	0,51	96	-0,12	-0,05	-0,93	138	-0,79	-0,49	-0,52
13	-0,26	0,33	-0,24	55	-0,68	-0,30	-0,72	97	-0,82	0,39	-0,29	139	1,23	0,97	-1,28
14	-0,40	-0,80	0,11	56	-0,40	-0,25	-0,87	98	0,06	-0,13	-1,11	140	-0,73	-0,28	-0,46
15	-0,63	-0,48	-0,36	57	-0,05	-0,36	-0,44	99	-0,88	-0,16	-0,43	141	1,43	0,31	-0,99
16	0,05	-0,17	-0,35	58	1,59	-0,60	1,31	100	0,84	2,37	-0,39	142	0,49	-0,38	-1,04
17	-0,69	0,18	-0,49	59	-0,06	-0,72	0,59	101	-0,86	-0,47	-0,60	143	-0,49	-0,50	-0,25
18	-0,22	1,10	0,30	60	-0,85	-0,43	-0,53	102	1,72	-0,20	-0,74	144	-0,28	-0,65	-0,19
19	0,14	-0,24	0,71	61	-0,83	-0,48	-0,56	103	-0,89	-0,41	-0,55	145	-0,81	-0,10	-0,46
20	1,66	-0,54	-0,03	62	-0,08	-0,09	0,83	104	-0,45	-0,37	-0,60	146	-0,71	-0,23	-0,62
21	-0,89	-0,28	-0,50	63	-0,71	-0,40	-0,39	105	-0,69	-0,68	-0,08	147	-0,88	-0,44	-0,53
22	-0,78	-0,19	-0,37	64	-0,01	-0,97	0,54	106	-0,37	-0,72	0,07	148	2,77	1,34	-1,93
23	0,30	-0,22	-1,37	65	-0,35	-0,47	1,07	107	-0,69	-0,40	-0,66	149	-0,65	1,35	0,34
24	-0,62	0,00	-0,53	66	0,15	-0,94	0,82	108	0,19	0,03	-0,66	150	-0,85	0,40	-0,20
25	4,58	0,93	-4,37	67	0,00	0,79	-0,15	109	-0,74	-0,30	-0,63	151	-0,31	-0,84	0,26
26	-0,43	-0,60	-0,12	68	0,45	1,10	-0,14	110	-0,40	-0,28	-0,46	152	-0,76	0,33	-0,38
27	-0,80	-0,32	-0,61	69	-0,37	-0,49	-0,62	111	1,12	-0,18	-1,58	153	-0,38	-0,27	-0,72
28	-0,72	-0,40	-0,57	70	2,55	1,17	1,61	112	-0,23	-0,26	0,25	154	-0,75	-0,45	-0,51
29	-0,60	-0,45	-0,66	71	0,22	-0,19	0,09	113	0,44	-1,27	1,54	155	-0,89	0,50	-0,09
30	-0,86	-0,38	-0,57	72	1,03	-0,16	-1,36	114	0,09	-0,64	-0,05	156	-0,84	1,79	0,35
31	-0,58	-0,40	-0,72	73	-0,14	-0,32	-1,10	115	-0,90	-0,29	-0,47	157	0,88	-0,70	-0,28
32	-0,08	-0,73	-0,01	74	-0,07	-0,60	0,15	116	-0,88	-0,43	-0,54	158	-0,79	0,22	-0,35
33	-0,49	-0,60	0,13	75	-0,58	-0,57	-0,18	117	-0,57	0,38	0,05	159	-0,71	-0,40	-0,64
34	1,41	0,14	-0,73	76	0,25	-0,99	1,77	118	-0,84	1,21	0,10	160	2,32	1,50	0,43
35	-0,55	1,76	0,06	77	-0,68	-0,32	-0,69	119	-0,70	-0,49	-0,21	161	-0,84	0,02	-0,37
36	4,48	-1,38	2,14	78	-0,26	-1,08	1,07	120	0,08	0,84	2,05	162	-0,21	-0,04	-0,45
37	0,73	-0,18	-0,46	79	-0,33	-0,97	1,32	121	0,17	-1,44	2,66	163	-0,23	1,86	0,73
38	2,36	1,50	-1,84	80	-0,17	1,57	0,94	122	-0,41	-0,73	0,06	164	-0,08	-0,04	-0,59
39	0,83	-0,98	1,59	81	0,88	-0,93	1,17	123	-0,70	0,15	-0,04	165	0,79	0,99	-0,10
40	-0,54	-0,85	0,47	82	-0,30	-0,65	-0,16	124	-0,85	-0,40	-0,52	166	-0,30	-0,52	0,49
41	-0,13	-0,23	-0,48	83	-0,46	0,13	-0,65	125	0,66	-1,01	2,46	167	0,21	-0,53	0,98
42	-0,05	-0,69	-0,15	84	2,55	0,64	-2,38	126	1,38	-2,00	3,33	168	-0,46	3,34	0,71

Projections des observations actives (suite)

	C1	C2	C3												
169	0,49	3,84	2,71	211	-0,59	2,15	0,98	253	-0,73	-0,24	-0,33	295	0,64	-0,60	0,06
170	-0,11	0,04	1,76	212	-0,85	2,66	0,70	254	-0,78	0,02	-0,40	296	-0,72	-0,63	-0,17
171	-0,84	-0,26	-0,51	213	0,69	-0,34	1,53	255	5,00	-1,08	0,43	297	-0,47	-1,04	1,11
172	-0,54	-0,46	0,36	214	-0,44	-0,81	0,29	256	0,13	-0,38	-0,15	298	-0,44	-0,42	-0,69
173	1,20	-0,61	0,23	215	-0,48	2,42	1,37	257	-0,56	-0,15	-0,61	299	-0,83	-0,25	-0,55
174	-0,86	-0,38	-0,52	216	-0,58	0,07	-0,54	258	-0,53	4,85	1,43	300	-0,21	-1,38	1,64
175	-0,34	-1,14	1,03	217	-0,55	-0,35	-0,02	259	-0,70	-0,23	-0,65	301	0,02	-1,00	0,67
176	-0,29	-0,59	-0,15	218	-0,88	-0,50	-0,55	260	0,66	-0,40	-0,77	302	-0,88	-0,18	-0,42
177	0,86	1,02	-0,44	219	-0,08	-0,36	-0,77	261	-0,14	0,87	0,60	303	-0,44	0,18	0,11
178	-0,56	-0,04	-0,36	220	1,66	0,26	-0,03	262	-0,83	-0,43	-0,62	304	-0,86	-0,45	-0,60
179	-0,61	-0,25	-0,56	221	0,35	-0,97	1,69	263	-0,66	-0,40	-0,69	305	-0,48	0,62	0,14
180	2,76	-0,12	1,31	222	-0,57	0,40	-0,24	264	-0,69	1,36	0,20	306	-0,79	-0,54	-0,31
181	0,21	-0,66	1,58	223	-0,59	0,03	0,35	265	-0,21	-0,47	0,77	307	0,49	-0,29	0,68
182	-0,62	-0,63	-0,26	224	-0,45	-0,47	-0,36	266	0,28	-0,46	-0,65	308	-0,85	2,43	0,61
183	-0,51	-0,46	0,20	225	0,33	-0,51	0,32	267	-0,73	-0,11	-0,10	309	-0,64	-0,29	-0,62
184	-0,71	-0,44	-0,58	226	-0,86	-0,45	-0,60	268	1,06	-1,38	1,74	310	-0,56	-0,44	-0,74
185	0,02	-0,72	0,30	227	-0,60	-0,70	0,09	269	-0,48	-0,36	-0,67	311	-0,90	-0,48	-0,54
186	-0,21	-0,22	-0,54	228	-0,09	0,10	1,23	270	-0,25	-0,71	0,71	312	-0,85	0,95	0,00
187	-0,36	1,02	0,06	229	1,44	-0,37	1,58	271	-0,49	-0,57	0,75	313	-0,25	-0,05	-0,89
188	-0,84	-0,48	-0,57	230	0,00	-0,76	0,68	272	-0,84	1,30	0,19	314	0,72	-0,33	-1,07
189	-0,43	-0,98	1,09	231	-0,62	-0,29	-0,63	273	-0,51	-0,19	-0,35	315	-0,36	0,24	-0,69
190	0,03	-0,51	0,63	232	-0,44	-0,60	1,42	274	-0,37	-0,09	-0,67	316	-0,80	2,04	0,37
191	-0,45	2,71	0,81	233	0,96	-0,19	0,85	275	-0,50	-0,38	-0,15	317	0,19	-1,13	0,99
192	-0,83	2,21	0,50	234	-0,58	-0,37	-0,71	276	-0,90	-0,29	-0,47	318	0,87	0,76	0,10
193	-0,77	-0,41	-0,67	235	-0,74	0,26	-0,31	277	-0,45	0,46	0,66	319	-0,53	0,42	-0,30
194	0,92	0,23	-1,34	236	-0,70	1,93	0,54	278	-0,77	-0,23	-0,39	320	1,46	-0,29	-0,94
195	-0,79	-0,11	-0,48	237	0,22	-0,57	-0,21	279	-0,38	-0,79	0,54	321	-0,37	-0,16	-0,30
196	1,21	-0,63	-0,30	238	-0,68	-0,46	-0,71	280	0,18	-0,89	0,51	322	-0,05	0,60	1,17
197	-0,49	0,45	-0,52	239	-0,71	0,14	-0,22	281	-0,48	0,10	-0,25	323	-0,55	0,43	0,10
198	0,39	0,24	-0,88	240	3,44	1,27	-0,60	282	-0,36	0,27	-0,65	324	0,20	-1,18	1,41
199	1,59	-0,14	0,45	241	-0,87	0,83	-0,02	283	3,09	0,86	-0,08	325	-0,79	1,60	0,22
200	0,88	0,55	-0,77	242	3,72	1,75	-3,11	284	0,56	0,11	2,68	326	-0,83	-0,30	-0,48
201	0,85	0,45	-0,46	243	0,53	-0,46	-0,31	285	0,14	-0,86	0,30	327	-0,46	1,63	-0,01
202	0,10	1,06	-0,95	244	-0,75	-0,49	-0,48	286	1,86	-2,25	4,20	328	0,22	-1,69	2,58
203	-0,33	-0,73	0,08	245	0,09	-0,20	-0,09	287	-0,67	-0,46	-0,64	329	-0,40	-0,11	0,61
204	-0,81	-0,06	-0,36	246	-0,37	1,04	-0,17	288	-0,77	0,25	-0,28	330	0,15	-0,32	-1,17
205	1,83	0,23	-1,95	247	-0,17	-0,31	-0,85	289	-0,77	-0,37	-0,61	331	1,46	0,17	-0,91
206	-0,88	-0,10	-0,39	248	-0,30	-0,71	-0,06	290	0,24	1,50	-0,38	332	1,79	-0,55	-0,51
207	-0,16	-0,17	-0,97	249	-0,88	-0,32	-0,49	291	1,84	0,12	-2,24	333	0,36	0,17	1,14
208	-0,01	-0,36	-0,83	250	0,35	-0,58	0,05	292	-0,48	0,77	0,26	334	-0,86	-0,35	-0,53
209	1,92	-0,13	0,09	251	-0,58	0,69	-0,28	293	1,05	-0,78	1,66	335	-0,73	-0,35	-0,49
210	-0,80	-0,31	-0,54	252	3,99	0,69	-2,61	294	-0,40	-0,42	-0,37	336	-0,30	-0,71	0,23

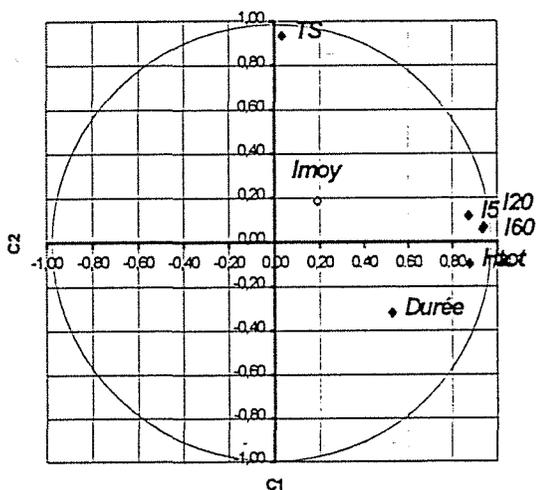
Projections des observations actives (suite)

	C1	C2	C3												
337	-0,55	-0,36	-0,53	381	-0,26	3,66	2,29	425	0,66	0,51	-0,61	469	-0,80	1,33	0,13
338	-0,29	-0,53	-0,57	382	-0,58	-0,75	0,36	426	2,61	-0,70	-0,42	470	-0,58	-0,45	-0,42
339	0,07	-0,50	0,15	383	-0,57	-0,28	-0,60	427	-0,13	-0,46	-0,74	471	-0,65	-0,45	0,38
340	-0,88	-0,24	-0,44	384	-0,39	-0,78	0,37	428	0,36	-0,53	0,59	472	0,12	0,01	-0,24
341	-0,72	-0,21	-0,47	385	-0,70	-0,15	-0,41	429	1,55	0,40	-0,05	473	-0,52	-0,35	-0,15
342	-0,08	0,10	-0,44	386	-0,35	-0,76	0,87	430	-0,01	0,98	0,96	474	0,28	-0,73	0,15
343	-0,05	0,68	1,20	387	-0,69	0,60	-0,13	431	-0,85	-0,12	-0,41	475	-0,77	5,05	1,66
344	-0,85	-0,43	-0,53	388	-0,80	-0,35	-0,49	432	0,04	-0,20	0,15	476	1,55	-0,08	-1,27
345	-0,79	-0,27	-0,55	389	-0,05	-0,23	-1,15	433	0,20	3,02	1,82	477	0,93	-1,70	3,32
346	-0,41	-0,64	0,44	390	-0,12	1,55	0,78	434	-0,78	-0,47	-0,62	478	-0,66	-0,82	0,20
347	0,06	-0,78	0,56	391	-0,15	-0,36	0,29	435	-0,81	-0,06	-0,42	479	-0,23	-0,40	-0,58
348	-0,84	-0,47	-0,59	392	-0,24	-0,40	0,58	436	-0,63	0,86	-0,29	480	0,79	0,23	-0,50
349	0,48	-0,67	0,54	393	0,36	-0,28	-1,12	437	0,20	-1,36	2,36	481	0,49	0,72	-1,09
350	1,23	0,00	-0,90	394	-0,81	0,53	-0,21	438	-0,27	0,43	0,30	482	0,43	-0,15	-1,06
351	2,92	0,25	4,63	395	-0,84	1,28	0,09	439	-0,64	-0,29	-0,51	483	-0,82	-0,50	-0,60
352	-0,64	-0,08	-0,26	396	-0,84	-0,18	-0,47	440	0,43	0,26	-0,80	484	2,10	-0,91	1,63
353	0,09	-0,78	1,14	397	0,80	-0,23	1,24	441	1,84	-0,17	0,11	485	1,15	-0,19	-1,21
354	-0,59	-0,41	-0,80	398	1,55	-0,07	-1,19	442	-0,16	8,47	2,59	486	-0,27	-0,24	-0,17
355	-0,80	-0,31	-0,27	399	0,99	-1,01	1,28	443	-0,72	0,59	-0,26	487	-0,83	-0,44	-0,62
356	0,86	0,34	-0,24	400	0,24	-1,11	1,55	444	4,82	0,90	-3,77	488	1,97	-0,70	-0,27
357	-0,55	-0,85	0,69	401	-0,90	-0,44	-0,52	445	-0,59	0,10	-0,48	489	-0,19	-0,27	0,83
358	-0,62	2,05	0,23	402	4,15	-0,53	0,48	446	0,12	0,60	-0,04	490	1,77	0,03	-1,83
359	0,02	0,39	-0,30	403	-0,77	-0,31	-0,59	447	-0,73	0,26	-0,33	491	1,40	2,78	0,85
360	-0,88	-0,49	-0,55	404	-0,04	-0,28	0,89	448	-0,60	-0,39	-0,76	492	0,03	-0,12	-1,10
361	-0,09	-0,97	0,54	405	0,62	-0,45	0,29	449	0,00	-0,37	-0,91	493	-0,53	1,07	0,15
362	0,25	-1,28	1,70	406	-0,86	-0,47	-0,57	450	-0,07	-0,71	0,23	494	0,97	0,24	0,59
363	-0,29	-0,37	-0,90	407	-0,26	-0,09	0,67	451	-0,82	0,00	-0,45	495	-0,42	-0,42	-0,55
364	-0,38	1,57	-0,18	408	-0,22	0,62	-0,38	452	0,07	-0,70	0,64	496	-0,43	-1,08	0,85
365	-0,46	-0,34	-0,66	409	-0,77	-0,43	-0,63	453	-0,29	1,83	-0,07	497	-0,69	-0,38	-0,44
366	-0,53	1,63	0,08	410	0,25	-0,10	-0,47	454	-0,41	2,04	0,13	498	0,54	-0,25	-1,37
367	-0,40	0,24	0,09	411	1,65	2,11	-0,09	455	-0,76	0,42	-0,29	499	-0,45	-0,32	-0,22
368	-0,74	-0,35	-0,53	412	-0,50	0,26	0,19	456	1,32	0,24	-1,97	500	0,53	-0,04	-1,41
369	-0,18	-0,95	1,27	413	-0,27	3,86	2,15	457	0,83	2,08	-0,49	501	1,86	0,61	1,81
370	-0,65	-0,43	-0,60	414	-0,76	-0,51	-0,45	458	-0,57	0,11	0,44	502	-0,33	1,54	0,77
371	-0,57	-0,34	-0,63	415	-0,46	-0,06	-0,13	459	0,25	-0,22	-0,81	503	0,85	-0,69	0,00
372	0,11	-0,38	-0,22	416	0,05	-0,16	-0,48	460	0,54	-0,34	-0,56	504	-0,05	-0,76	0,55
373	-0,67	0,22	-0,23	417	0,63	-1,34	1,64	461	-0,49	-0,75	0,00	505	-0,77	-0,21	-0,41
374	3,98	1,23	-2,68	418	1,74	-1,60	4,31	462	-0,78	-0,21	-0,26	506	-0,62	-0,44	-0,69
375	2,45	-0,37	-0,82	419	-0,89	1,36	0,19	463	1,50	0,77	-0,78	507	-0,15	-0,10	-0,31
376	-0,82	-0,50	-0,36	420	-0,58	0,08	0,24	464	-0,04	-0,47	0,91	508	1,00	-1,14	2,45
377	-0,70	1,83	0,22	421	4,00	0,31	-3,09	465	-0,66	-0,34	-0,50	509	-0,30	1,35	-0,14
378	0,08	-0,72	0,28	422	-0,77	-0,32	-0,44	466	0,09	-0,49	1,39	510	0,55	0,34	1,29
379	-0,71	0,07	0,51	423	1,15	-0,27	-1,01	467	1,98	1,26	3,43				
380	-0,71	-0,64	-0,09	424	-0,63	-0,61	0,40	468	-0,77	-0,42	-0,68				

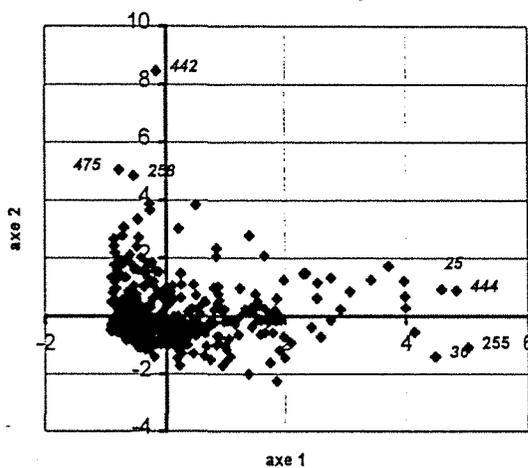
Projections des observations supplémentaires :

C1 C2 C3

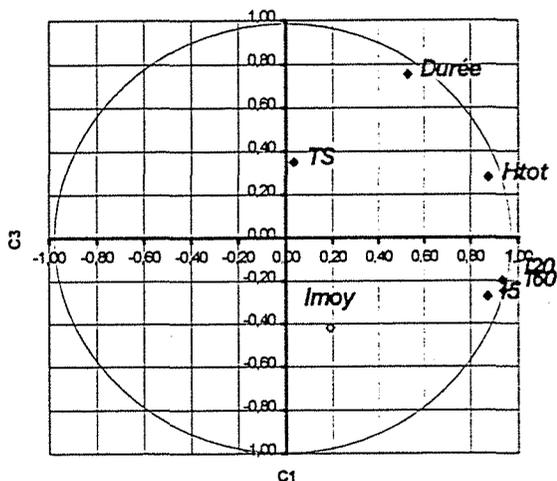
A.C.P. pluviométrie d'été



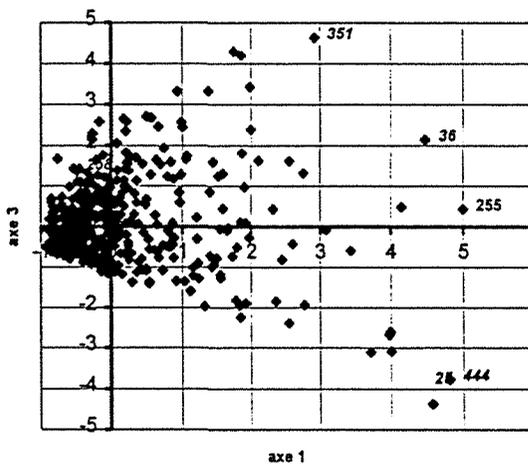
A.C.P. pluviométrie d'été



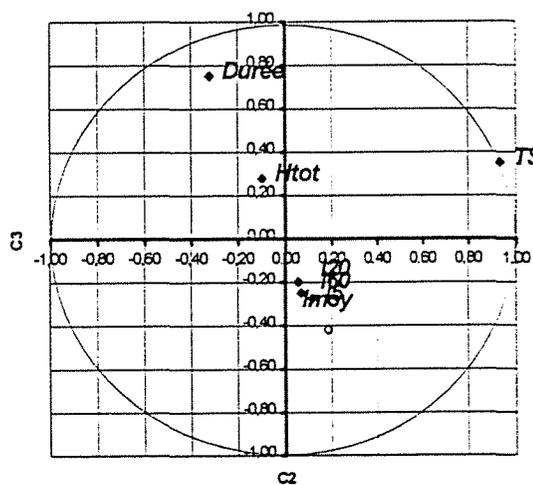
A.C.P. pluviométrie d'été



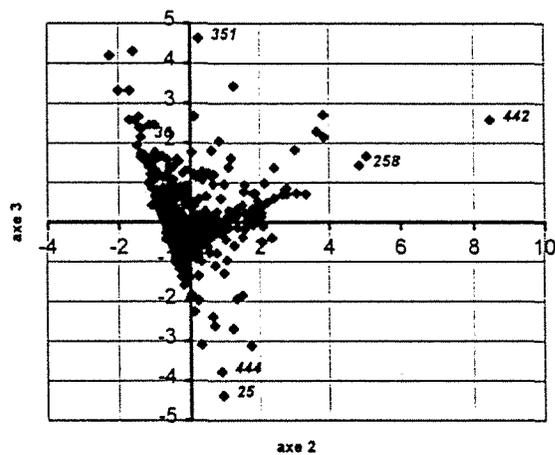
A.C.P. pluviométrie d'été



A.C.P. pluviométrie d'été

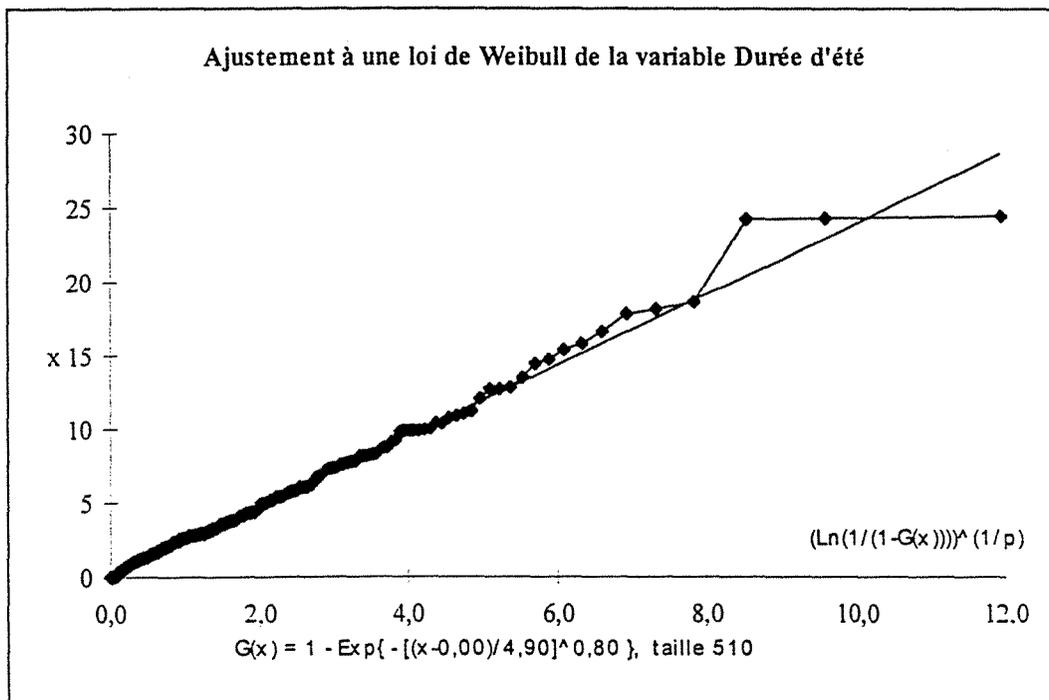
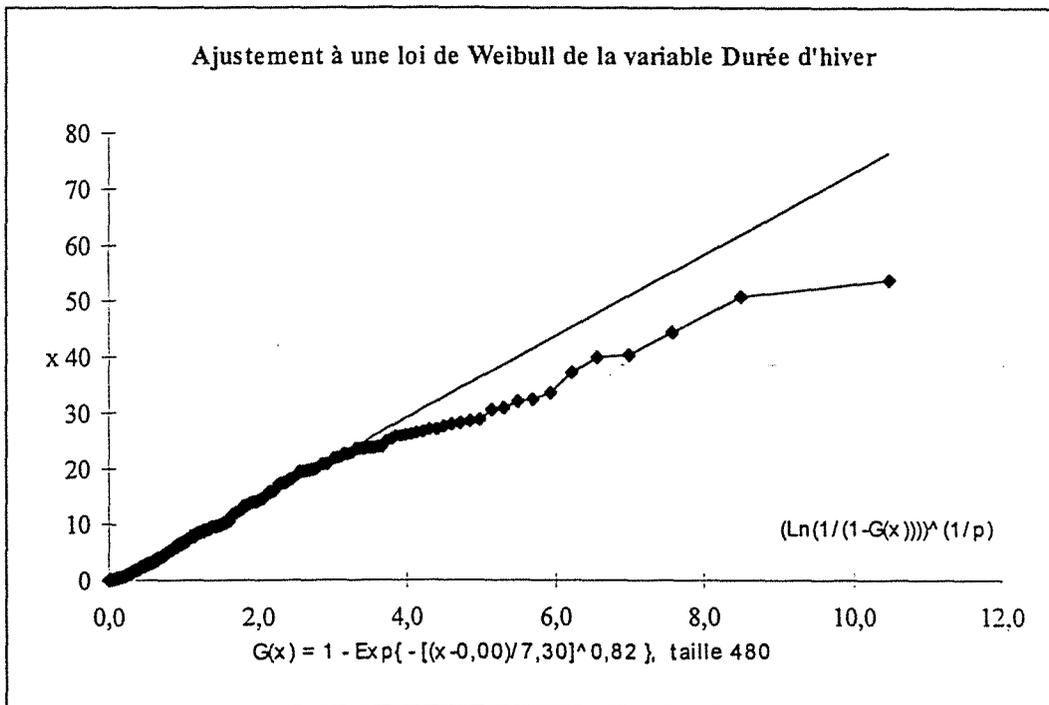


A.C.P. pluviométrie d'été

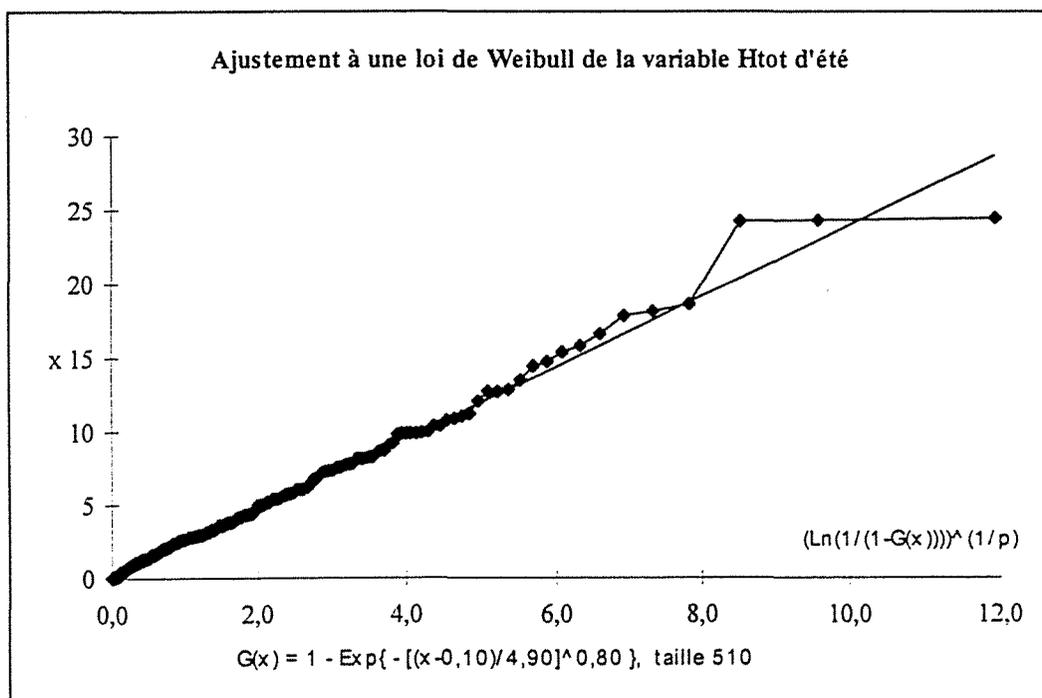
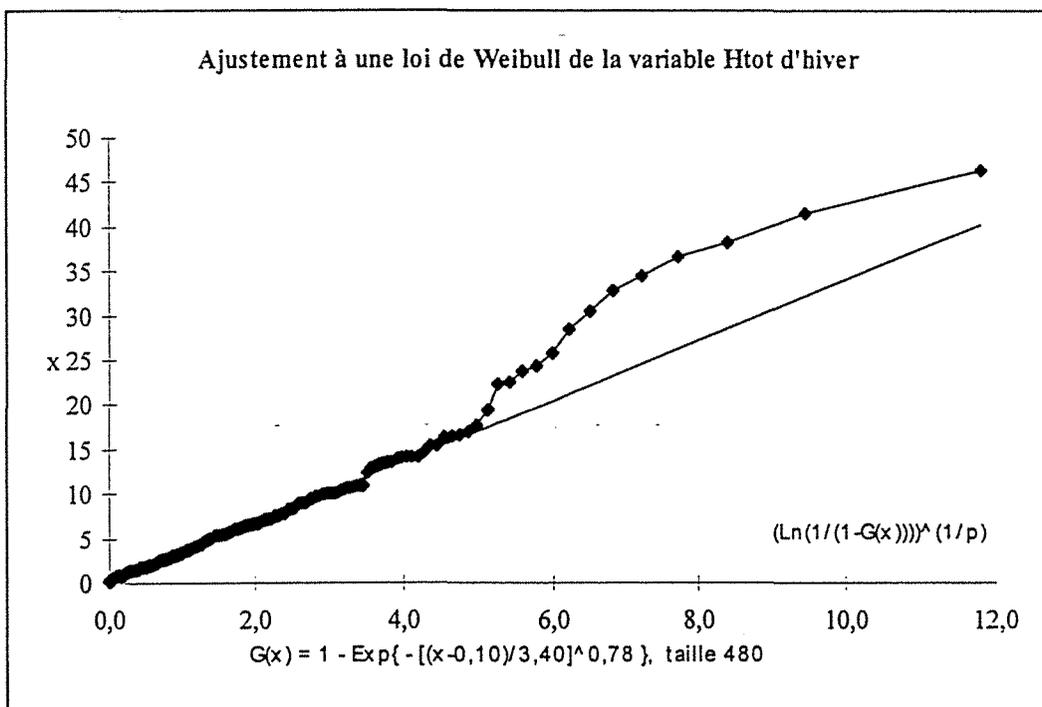


ANNEXE III.4 - Résultats graphiques des ajustements de lois sur les échantillons d'hiver et d'été des variables de pluviométrie

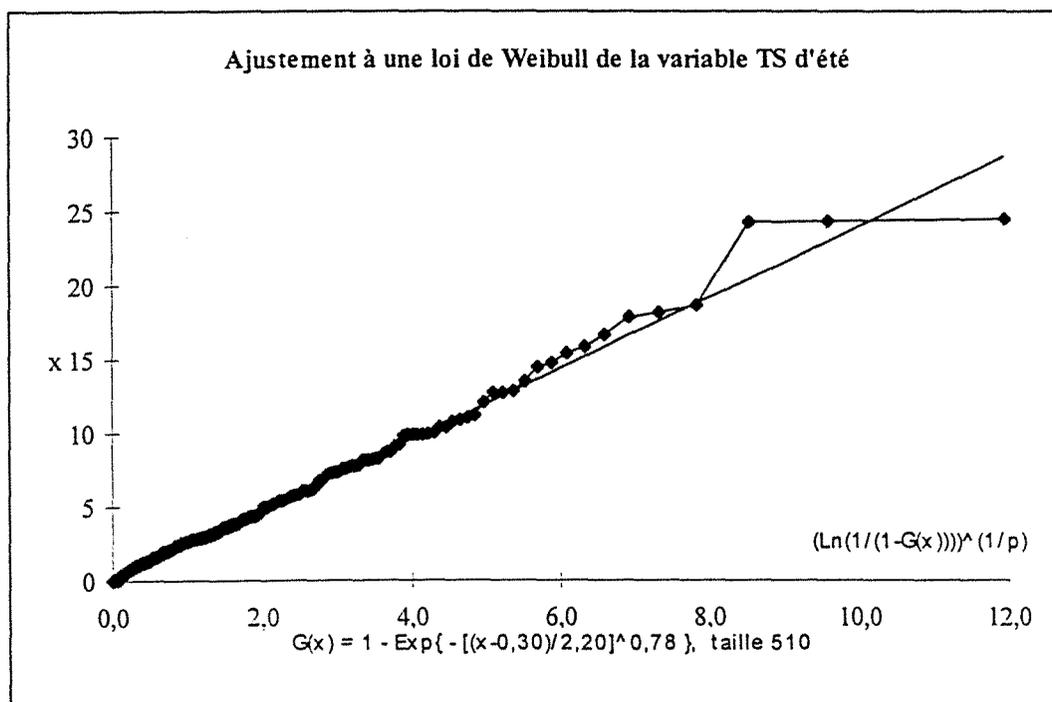
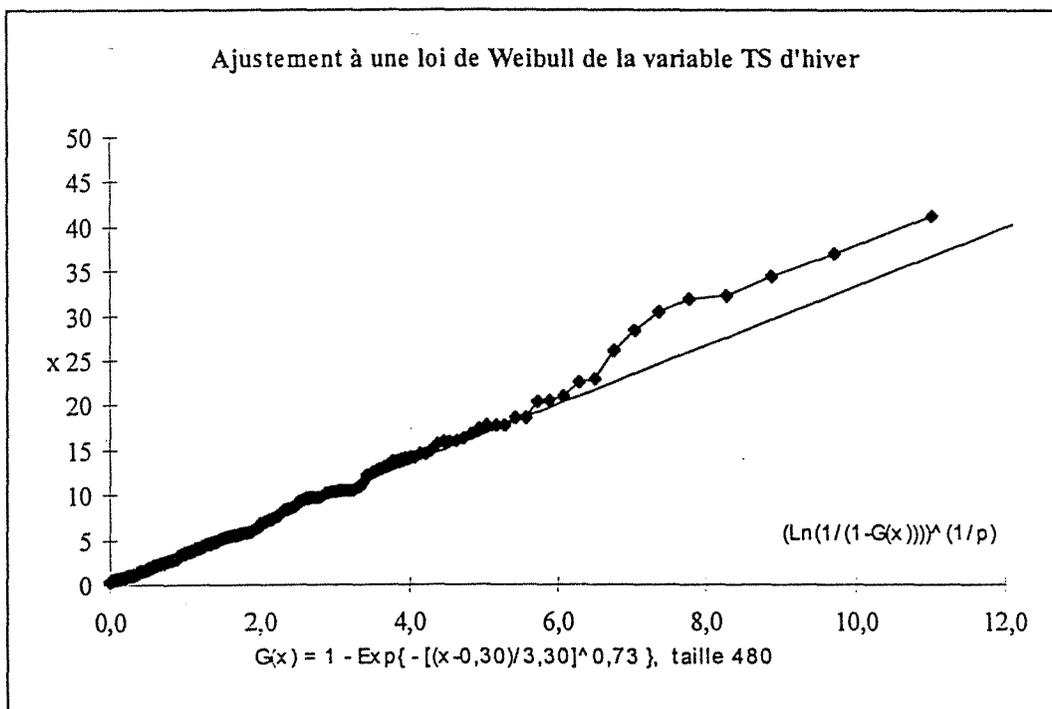
Durée événement



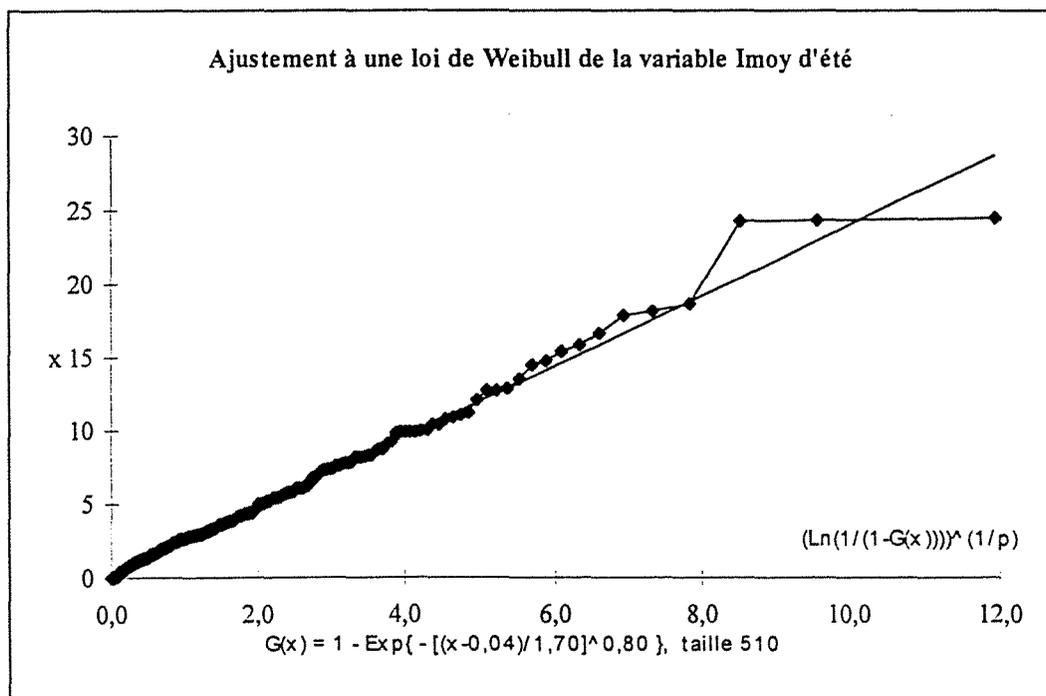
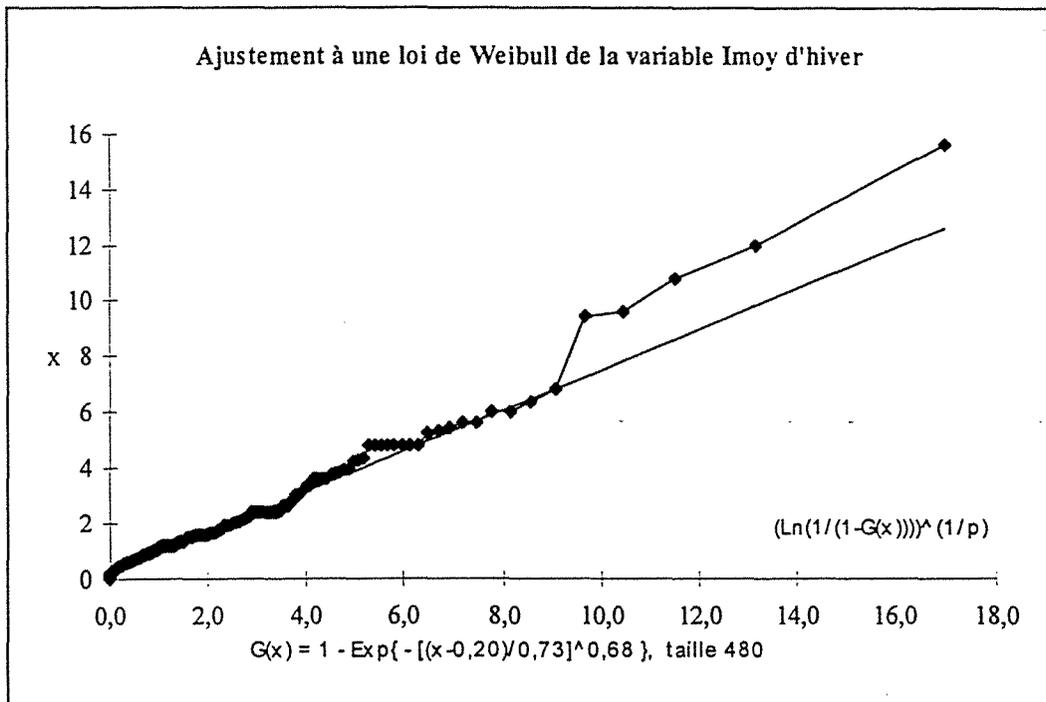
Hauteur totale



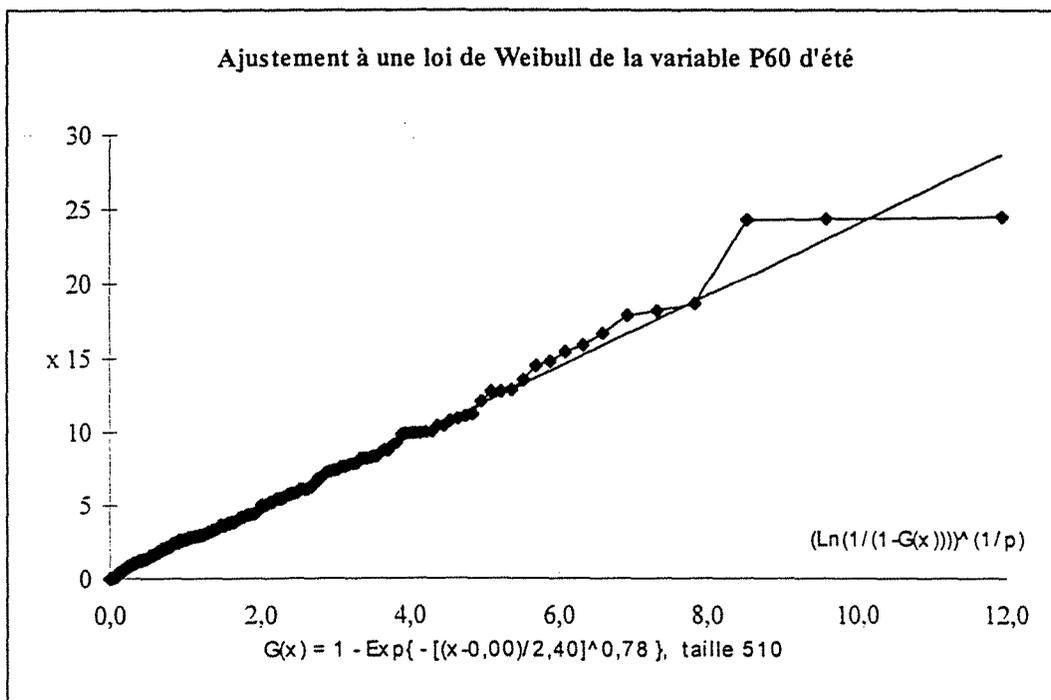
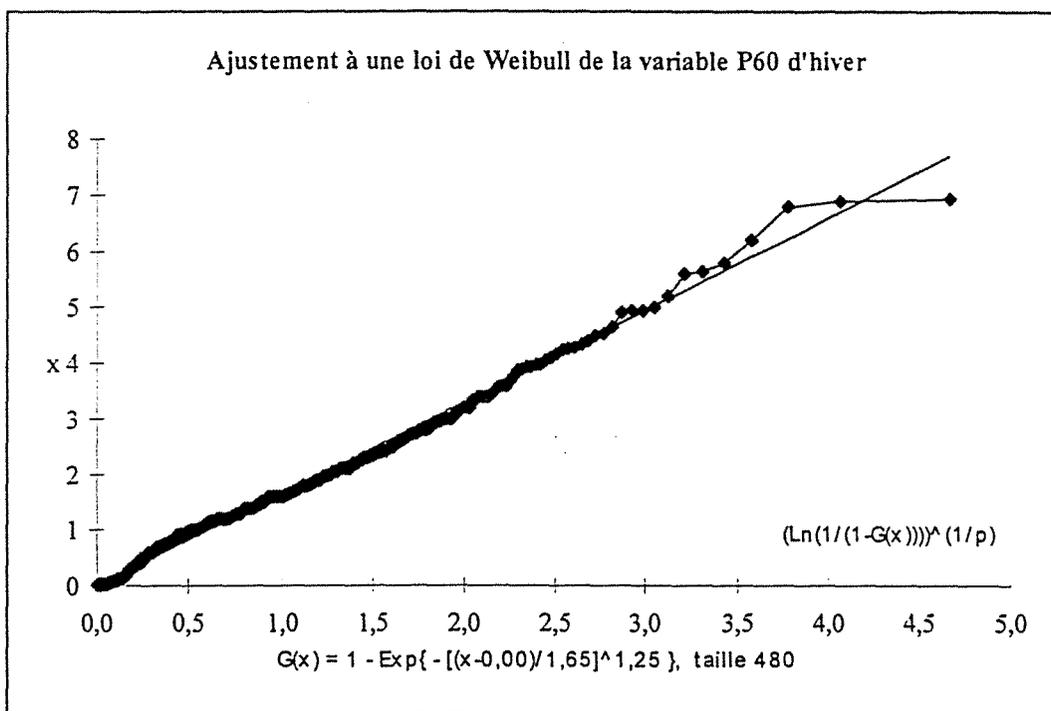
Temps sec



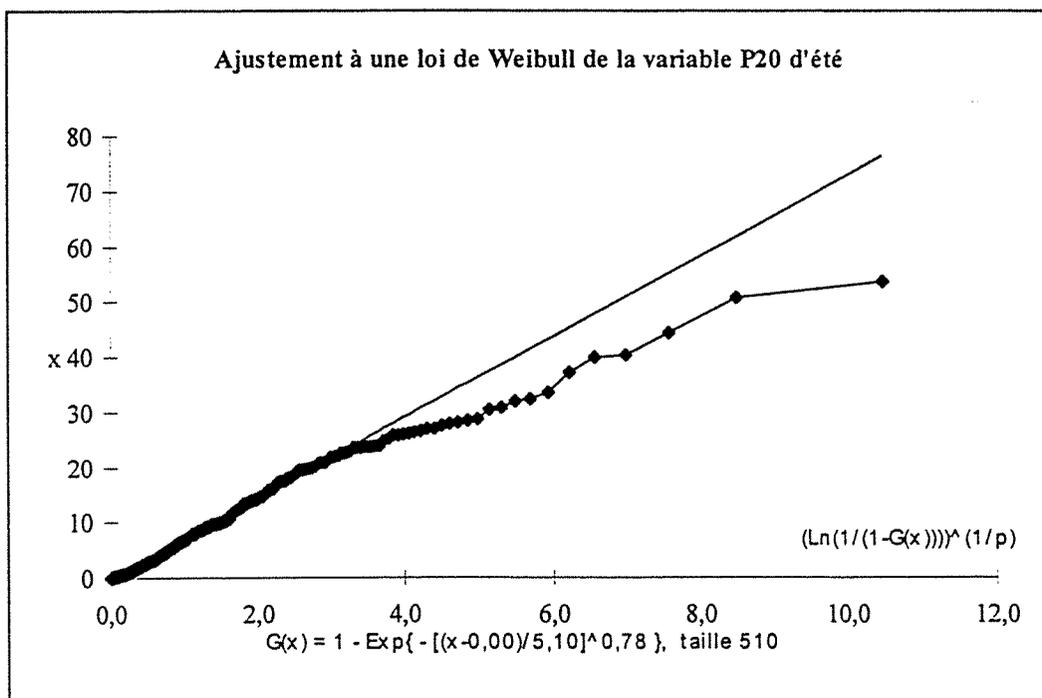
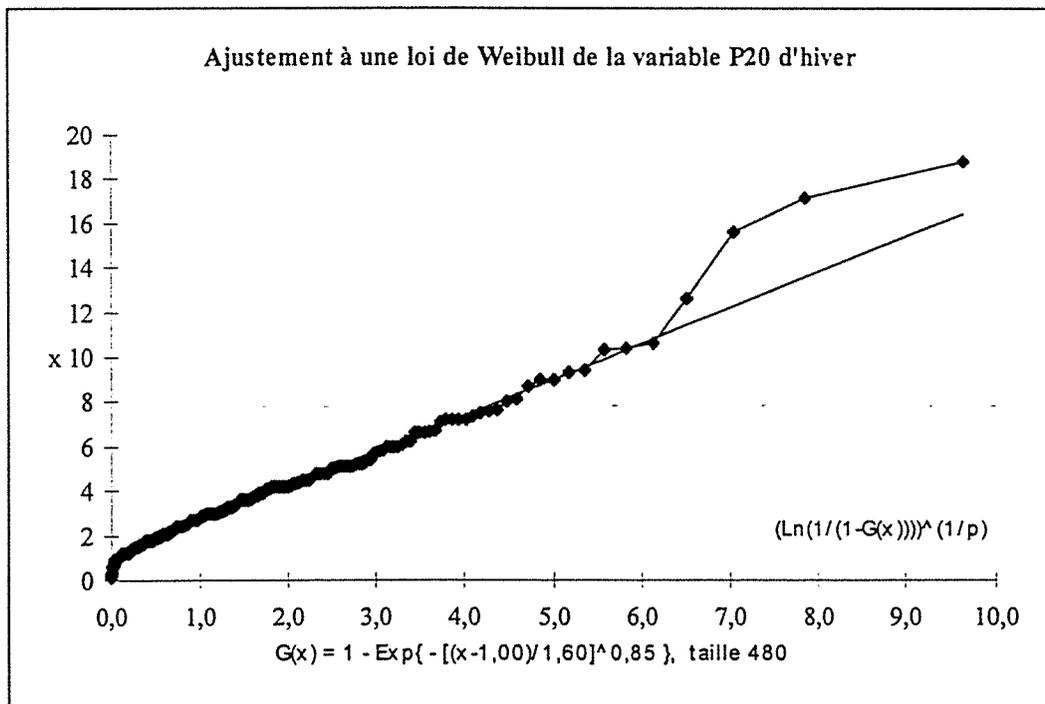
Intensité moyenne



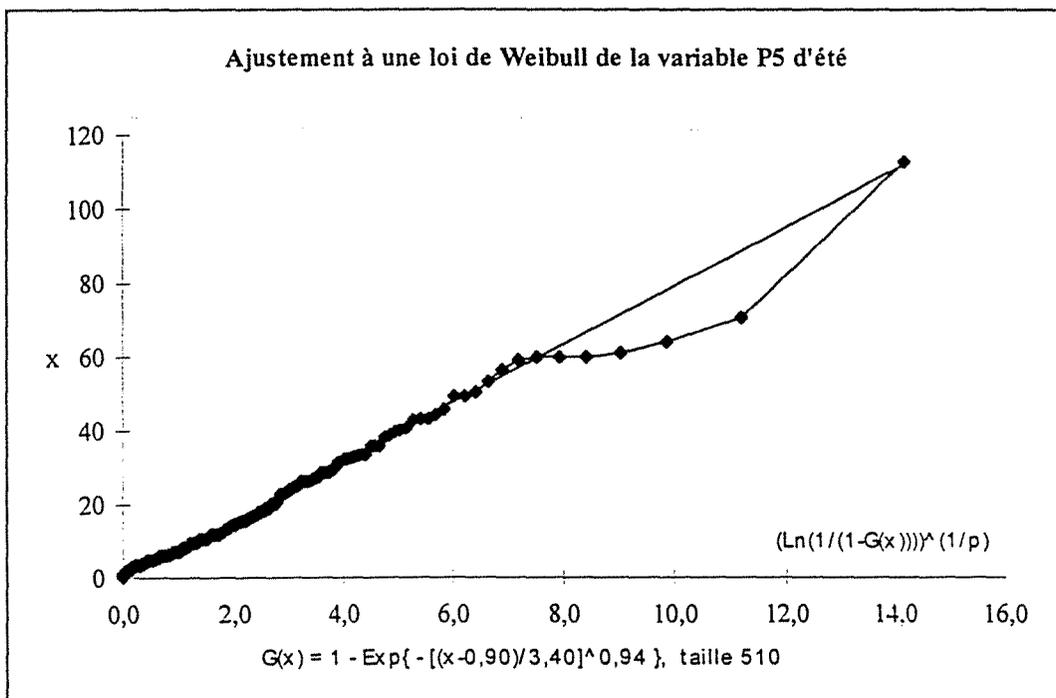
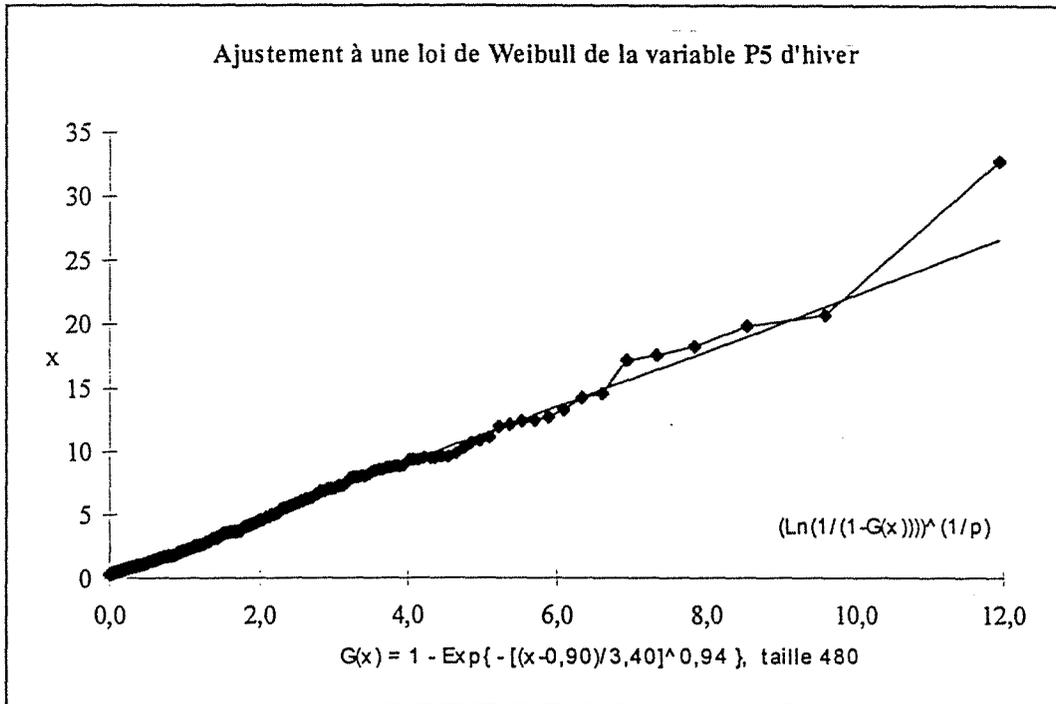
Intensité moyenne maximale sur 60 minutes



Intensité moyenne maximale sur 20 minutes



Intensité moyenne maximale sur 5 minutes



ANNEXE III.5 - A.C.P. sur les variables de pluviométrie et de pollution

Caractéristiques de l'Analyse en Composantes Principales :

6 variables actives

5 variables supplémentaires

38 observations actives

0 observations supplémentaires

3 premières composantes principales étudiées

Moyennes des observations actives :

6,63	2,64	5,22	10,51	0,31	2,92	1081,90	111,34	249,95	518,42	1,60
------	------	------	-------	------	------	---------	--------	--------	--------	------

Ecart-types des observations actives :

5,10	1,51	3,57	8,17	0,31	3,03	856,82	98,33	188,17	414,24	1,96
------	------	------	------	------	------	--------	-------	--------	--------	------

Matrice des coefficients de corrélation :

	H tot	P60	P20	P5	Durée	TS	MES max	MES max/h	MES tot	MES moy	I moy
H tot	1,00	0,33	0,20	0,02	0,77	-0,23	-0,27	0,00	0,40	-0,45	-0,10
P60	0,33	1,00	0,88	0,77	-0,12	-0,19	-0,19	0,28	0,08	-0,18	0,45
P20	0,20	0,88	1,00	0,94	-0,09	-0,06	-0,02	0,45	0,22	-0,01	0,58
P5	0,02	0,77	0,94	1,00	-0,21	-0,02	0,07	0,52	0,22	0,08	0,57
Durée	0,77	-0,12	-0,09	-0,21	1,00	-0,13	-0,14	0,04	0,53	-0,35	-0,38
TS	-0,23	-0,19	-0,06	-0,02	-0,13	1,00	0,72	0,25	0,23	0,65	0,03
MES max	-0,27	-0,19	-0,02	0,07	-0,14	0,72	1,00	0,50	0,45	0,88	0,13
MES max/h	0,00	0,28	0,45	0,52	0,04	0,25	0,50	1,00	0,80	0,50	0,34
MES tot	0,40	0,08	0,22	0,22	0,53	0,23	0,45	0,80	1,00	0,32	0,01
MES moy	-0,45	-0,18	-0,01	0,08	-0,35	0,65	0,88	0,50	0,32	1,00	0,35
I moy	-0,10	0,45	0,58	0,57	-0,38	0,03	0,13	0,34	0,01	0,35	1,00

Valeurs propres :

C1	C 2	C 3
2,81	1,87	0,93

Variances expliquées :

C1	C 2	C 3
0,47	0,31	0,15

Variances cumulées :

C1	C 2	C 3
0,47	0,78	0,93

rejections des variables actives :

	C1	C 2	C 3
H tot	0,27	0,91	0,15
P60	0,94	0,04	-0,05
P20	0,98	-0,07	0,10
P5	0,92	-0,22	0,09
Durée	-0,09	0,92	0,25
TS	-0,17	-0,38	0,91

Projections des variables suppl_ementaires :

	C1	C 2	C 3
MES max	-0,11	-0,36	0,64
MES max/h	0,41	-0,10	0,33
MES tot	0,18	0,37	0,48
MES moy	-0,11	-0,53	0,48
I moy	0,54	-0,32	0,00

Projections des observations actives

	C1	C 2	C 3
1	-0,12	-0,50	3,17
2	-0,68	0,94	-0,72
3	0,56	1,51	-0,47
4	-1,13	-0,49	-0,72
5	-0,97	-0,48	1,13
6	1,02	1,26	0,47
7	-0,83	-0,84	-0,36
8	0,91	2,71	0,41
9	-0,32	-0,18	-0,54
10	0,75	-1,00	-0,11
11	2,77	-0,76	-0,52
12	-0,02	1,52	0,10
13	-1,08	0,34	-0,52
14	-0,54	1,49	0,05
15	-1,09	-0,25	-0,56
16	-1,12	-0,75	1,90
17	-1,15	-0,74	0,27
18	-0,35	0,90	0,59
19	0,00	-0,03	-0,43
20	0,83	-0,44	-0,79
21	-0,89	-0,24	-1,18
22	-0,07	-0,37	-0,96
23	0,07	-0,18	-0,91
24	-0,86	-0,16	-0,20
25	1,96	-0,65	0,90
26	-0,44	-0,62	-0,93
27	0,74	-0,81	0,35
28	1,07	-1,46	2,33
29	-0,17	-0,70	-1,16
30	2,54	-0,18	-0,47
31	-0,35	-0,01	-0,13
32	-1,05	-0,86	0,80
33	0,52	-0,51	-0,42
34	-0,18	-0,01	-0,99
35	1,03	-0,01	-0,76
36	-0,30	3,06	1,32
37	-0,73	-0,57	0,97
38	-0,37	0,09	-0,91

Projections des observations supplémentaires :

	C1	C 2	C 3
--	----	-----	-----

ANNEXES V

ANNEXE V.1 - Détermination des bornes de variation des paramètres - Calage des modèles pour MEstot

Modèle SWMM-SWMM			
MEStot			
	a1	b1	c1
Départ:	1	0,18	1
1	0,123	0,1171	0,982
2	0,446	0,1873	1,073
3	0,660	0,1976	1,45
4	0,257	0,1266	0,976
5	0,284	0,1449	0,986
6	0,949	0,265	1,413
7	0,286	0,1383	0,993
8	1,196	0,212	3,649
9	0,222	0,1373	0,96
10	0,402	0,1842	1,000
11	1,217	0,3921	1,139
12	0,215	0,1641	0,923
13	0,210	0,1318	0,929
14	0,422	0,1868	1,045
15	0,169	0,0999	0,938
16	0,271	0,1403	0,99
17	0,236	0,1208	0,983
18	0,155	0,1414	0,938
19	0,144	0,1188	0,957
20	0,590	0,2447	1,253
21	0,391	0,1809	1,003
22	0,421	0,1902	1,013
23	0,339	0,1667	0,938
24	0,180	0,1048	0,934
25	0,065	0,1035	0,988
26	0,419	0,1905	1,00
27	0,218	0,1224	0,99
28	0,239	0,1296	0,998
29	0,963	0,3911	1,122
30	0,206	0,1469	0,974
31	0,124	0,1009	0,954
32	0,293	0,143	0,993
33	0,442	0,1951	1,004
34	1,417	0,4192	1,50
35	0,382	0,1781	0,996
36	0,196	0,1733	0,906
37	0,266	0,1351	0,987
38	0,815	0,2822	1,205
Moyenne:	0,417	0,1791	1,108
Maximum:	1,417	0,4192	3,649
Minimum:	0,065	0,0999	0,906

Modèle Servat-SWMM					
MES tot					
	a2	b2	c2	d2	e2
Départ:	1	1	0,5	0,18	1
1	1,1841	1,1025	0,831	0,1956	1,2478
2	1,2577	1,1316	0,728	0,1930	2,9492
3	1,3015	1,152	0,7502	0,1876	3,6962
4	1,2742	1,1628	0,8764	0,2209	1,9105
5	1,2744	1,1481	0,9509	0,215	1,6963
6	1,4768	1,3087	1,1574	0,2088	4,2814
7	1,3048	1,164	0,9446	0,2273	1,3490
8	1,2562	1,1281	0,7228	0,1840	5,9137
9	1,3196	1,1615	0,9137	0,2136	1,7023
10	1,356	1,2194	1,0391	0,2283	1,0462
11	1,8168	1,4084	1,2999	0,2616	1,9943
12	1,2754	1,1298	0,8442	0,1894	2,5675
13	1,252	1,1322	0,8174	0,2044	2,1856
14	1,1373	1,0691	0,6579	0,1910	2,8809
15	1,190	1,098	0,7540	0,2058	1,8064
16	1,2551	1,1351	0,9391	0,2126	1,3844
17	1,2597	1,1297	0,8990	0,2188	1,5401
18	1,2356	1,1377	0,8590	0,1948	1,8287
19	1,2537	1,1313	0,8297	0,2030	1,5670
20	1,3977	1,1946	0,8463	0,230	4,0982
21	1,1237	1,0620	0,6052	0,197	2,2540
22	1,4657	1,2352	0,9937	0,2383	2,746
23	1,2039	1,1049	0,6840	0,2033	2,3883
24	1,1863	1,1023	0,7632	0,2048	1,8838
25	1,1523	1,0840	0,7432	0,1934	1,0873
26	1,4294	1,2628	1,041	0,2404	1,6328
27	1,2736	1,1401	0,9124	0,2126	1,211
28	1,2417	1,1249	0,9165	0,2109	1,0480
29	1,7824	1,388	1,2644	0,2926	2,213
30	1,3840	1,1948	0,9155	0,2055	1,4633
31	1,1992	1,1021	0,7811	0,2007	1,5764
32	1,2737	1,1516	0,9519	0,2201	1,3807
33	1,3980	1,2447	1,0674	0,2246	1,393
34	1,8026	1,4759	1,3190	0,2525	3,4374
35	1,4335	1,2268	0,9452	0,2193	2,7739
36	1,2132	1,1067	0,801	0,1828	2,6009
37	1,2646	1,1410	0,9316	0,2159	1,6457
38	1,5782	1,3951	1,1908	0,2341	2,6751
Moyenne:	1,3286	1,178	0,9076	0,2141	2,1857
Maximum:	1,8168	1,4759	1,3190	0,2926	5,9137
Minimum:	1,1237	1,0620	0,6052	0,1828	1,0462

SWMM-Servat						
MESTot						
	a3	b3	c3	d3	e3	f3
Départ:	1	1	0,4	0,8	0,5	1
1	0,957	0,97	0,261	0,689	0,327	1,023
2	0,961	0,984	0,285	0,761	0,342	1,022
3	0,964	0,978	0,282	0,726	0,325	1,066
4	0,967	0,963	0,264	0,741	0,331	1,068
5	1,005	0,996	0,298	0,796	0,396	1,008
6	1,004	0,995	0,297	0,789	0,393	1,016
7	0,963	0,973	0,27	0,737	0,347	1,007
8	1,014	1,004	0,303	0,806	0,393	1,01
9	0,963	0,969	0,268	0,721	0,327	1,033
10	0,966	0,976	0,273	0,699	0,347	1,001
11	0,97	0,98	0,281	0,682	0,344	1,003
12	0,966	0,983	0,279	0,753	0,344	1,03
13	0,99	0,989	0,29	0,788	0,375	1,042
14	0,985	0,99	0,29	0,773	0,373	1,038
15	0,923	0,974	0,262	0,752	0,32	0,995
16	1,081	1,017	0,341	0,844	0,473	1,018
17	0,999	1,007	0,305	0,805	0,407	0,991
18	0,977	0,967	0,268	0,722	0,329	1,108
19	0,972	0,935	0,244	0,643	0,268	1,181
20	0,957	0,95	0,261	0,574	0,281	1,146
21	0,914	0,96	0,264	0,718	0,289	1,075
22	0,883	0,983	0,268	0,669	0,312	0,964
23	0,851	0,955	0,251	0,551	0,241	0,994
24	0,939	0,936	0,235	0,63	0,27	1,249
25	0,865	0,956	0,224	0,517	0,242	1,002
26	0,961	0,974	0,273	0,717	0,339	1,01
27	0,899	0,983	0,257	0,648	0,314	0,993
28	0,981	0,962	0,264	0,679	0,338	1,004
29	0,969	0,996	0,293	0,766	0,38	0,998
30	0,862	0,959	0,247	0,518	0,239	0,998
31	0,943	0,957	0,251	0,704	0,296	1,094
32	1,028	1,016	0,321	0,828	0,435	0,996
33	0,971	0,986	0,283	0,737	0,361	1,002
34	1,024	1,01	0,31	0,838	0,432	0,999
35	0,991	0,941	0,257	0,607	0,274	1,218
36	0,964	0,993	0,285	0,767	0,359	0,97
37	1,001	1,014	0,311	0,816	0,418	0,98
38	1,04	1,009	0,313	0,834	0,438	1,01
Moyenne:	0,965	0,979	0,277	0,72	0,343	1,036
Maximum:	1,081	1,017	0,341	0,844	0,473	1,249
Minimum:	0,851	0,935	0,224	0,517	0,239	0,964

Modèle Servat-Servat						
MESTot						
	a4	b4	c4	d4	e4	f4
Départ:	1	1	0,4	0,8	0,5	1
1	0,9252	0,935	0,2842	0,6244	0,3194	1,0292
2	0,9395	0,949	0,3445	0,7221	0,3204	1,1338
3	0,9281	0,9553	0,3494	0,6823	0,3148	1,0624
4	0,9198	0,9234	0,2947	0,7023	0,3206	1,0767
5	0,9177	0,985	0,3311	0,7148	0,3922	0,9866
6	0,9446	0,9791	0,3566	0,6948	0,3992	0,997
7	0,9754	0,8928	0,2905	0,6778	0,3412	1,0414
8	0,95	0,9805	0,3725	0,7206	0,3997	0,9955
9	0,9173	0,9405	0,3088	0,6728	0,3159	1,0281
10	0,9942	0,8991	0,3073	0,6174	0,3505	1,0046
11	0,9996	0,9287	0,3412	0,5997	0,3525	1,0204
12	0,9449	0,9424	0,3244	0,7056	0,3244	1,1208
13	0,9573	0,9391	0,3287	0,7554	0,3499	1,1644
14	0,9395	0,9592	0,3416	0,7109	0,3603	1,0787
15	0,8812	0,9442	0,2924	0,7249	0,3042	1,0159
16	0,9831	0,9773	0,3677	0,782	0,4538	1,0083
17	0,9176	0,979	0,3295	0,7589	0,3957	0,9889
18	0,9275	0,9422	0,3073	0,672	0,3181	1,0697
19	0,942	0,8956	0,2803	0,6134	0,2547	1,195
20	0,8474	0,9543	0,3264	0,5419	0,2882	0,9703
21	0,8424	0,9519	0,3263	0,701	0,2911	0,9203
22	0,8815	0,9485	0,3165	0,6127	0,3027	1,0026
23	0,9102	0,8787	0,2776	0,4618	0,1614	1,8166
24	0,8272	0,9651	0,2788	0,6167	0,2809	0,9185
25	1,0262	0,8051	0,2324	0,4785	0,2195	1,5023
26	0,9536	0,9207	0,3134	0,655	0,3323	1,033
27	0,8999	0,9418	0,2878	0,5848	0,3103	1,0049
28	0,9685	0,9019	0,2874	0,6007	0,342	1,0069
29	0,8997	0,9815	0,3546	0,6804	0,3887	0,9956
30	1,0146	0,86	0,2834	0,477	0,2127	1,3651
31	0,8584	0,9621	0,2897	0,6752	0,2888	0,9605
32	0,981	0,9511	0,3441	0,7607	0,4231	1,018
33	0,9801	0,9252	0,3249	0,6555	0,3601	1,0243
34	0,9736	0,9795	0,3761	0,7484	0,4328	1,0054
35	0,8419	0,9637	0,3204	0,5823	0,2787	0,9606
36	0,9605	0,937	0,3229	0,7111	0,3315	1,2268
37	0,9522	0,9648	0,3368	0,7454	0,406	1,0115
38	0,97	0,9792	0,3728	0,7602	0,4305	1,0076
Moyenne:	0,934	0,94	0,3191	0,6632	0,3334	1,0728
Maximum:	1,0262	0,985	0,3761	0,782	0,4538	1,8166
Minimum:	0,8272	0,8051	0,2324	0,4618	0,1614	0,9185

ANNEXE V.2 - Résultat du "Jacknife" pour MEstot

Modèle SWMM-SWMM

38 val	MES tot					
	a=	b=	c=	e ² =	r=	R2=
	0,4915	0,5240	4,2471	24101	0,5983	0,3010
1	0,5482	0,5240	4,1663	24164	0,5937	0,3088
2	0,4889	0,5240	4,2843	24676	0,5984	0,2964
3	0,4901	0,5240	4,2654	24739	0,5989	0,2998
4	0,4930	0,5240	4,2532	24697	0,5924	0,2873
5	0,4784	0,5240	4,2539	24625	0,5921	0,2912
6	0,5351	0,5240	3,3411	16184	0,5881	0,2022
7	0,4908	0,5240	4,2485	24750	0,5917	0,2906
8	0,5273	0,5240	3,8064	23673	0,5580	0,2376
9	0,4919	0,5240	4,2478	24750	0,5960	0,2962
10	0,4695	0,5240	4,3094	23778	0,6115	0,3283
11	0,4856	0,5240	4,2385	21828	0,6376	0,3764
12	0,4896	0,5240	4,3374	24529	0,6038	0,3080
13	0,4921	0,5240	4,2969	24525	0,6028	0,3022
14	0,4663	0,5240	4,6254	23790	0,6135	0,3263
15	0,4957	0,5240	4,2724	24455	0,5991	0,2939
16	0,4578	0,5240	4,3068	24370	0,5903	0,2847
17	0,4963	0,5240	4,2402	24711	0,5975	0,2971
18	0,4993	0,5240	4,3515	24260	0,6059	0,3147
19	0,4948	0,5240	4,2558	24648	0,5968	0,2936
20	0,4915	0,5240	4,2469	24752	0,5920	0,2905
21	0,4903	0,5240	4,2657	24683	0,5897	0,2818
22	0,4913	0,5240	4,2434	24742	0,5919	0,2919
23	0,4903	0,5240	4,2677	24680	0,5916	0,2849
24	0,4970	0,5240	4,3048	24224	0,6069	0,3062
25	0,5237	0,5240	4,1740	24168	0,6055	0,3068
26	0,4898	0,5240	4,2471	24678	0,5918	0,2946
27	0,4875	0,5240	4,2561	24736	0,5986	0,3015
28	0,4532	0,5240	4,3559	24407	0,6001	0,3008
29	0,4891	0,5240	4,2452	23993	0,6042	0,3220
30	0,4911	0,5240	4,2466	24748	0,5889	0,2868
31	0,5022	0,5240	4,2724	24287	0,6056	0,3055
32	0,4825	0,5240	4,2647	24678	0,5997	0,3037
33	0,4729	0,5240	4,2692	23388	0,6157	0,3345
34	0,4921	0,5240	4,1738	21845	0,6350	0,3704
35	0,4915	0,5240	4,2469	24752	0,5937	0,2931
36	0,4745	0,5240	4,7761	23162	0,6025	0,3268
37	0,4900	0,5240	4,2484	24750	0,5973	0,2998
38	0,4917	0,5240	4,1866	23708	0,6105	0,3288
moyennes	0,4917	0,5240	4,2472	24040	0,5997	0,3017

ANNEXE V.3 - Détermination des bornes de variation des paramètres - Calage des modèles pour MESmax/h

Modèle SWMM-SWMM			
MESmax/h			
Départ:	a1	b1	c1
	1	0,18	1
1	0,3816	0,1246	0,9132
2	0,8352	0,1681	0,0000
3	1,0125	0,1803	1,0437
4	0,7035	0,1355	0,8041
5	0,9486	0,1733	0,9878
6	3,0777	0,5000	3,0000
7	1,4481	0,2494	1,0689
8	1,0397	0,1806	1,2715
9	1,3558	0,2175	1,1271
10	2,6535	0,4041	1,0356
11	4,0000	0,5000	3,0000
12	0,2993	0,1557	0,3608
13	0,5212	0,1325	0,5846
14	0,7477	0,1597	0,2648
15	0,5228	0,1132	0,7171
16	1,0722	0,1892	1,0110
17	1,0460	0,1869	1,0079
18	0,2147	0,1297	0,5727
19	0,2866	0,1112	0,7395
20	1,1177	0,1949	1,3149
21	0,9210	0,1690	0,7021
22	1,4652	0,2382	1,4321
23	0,9335	0,1724	0,8399
24	0,5344	0,1164	0,6679
25	0,5142	0,1343	0,9663
26	1,8605	0,3010	1,3090
27	1,4579	0,2344	1,0420
28	1,4370	0,2357	1,0083
29	4,0000	0,5000	3,0000
30	1,6356	0,2222	1,1862
31	0,5825	0,1381	0,8200
32	1,2734	0,2200	1,0420
33	2,8389	0,3860	1,3565
34	4,0000	0,5000	3,0000
35	1,7564	0,2486	1,8764
36	0,3578	0,1715	0,3527
37	1,4612	0,2424	1,1209
38	1,6736	0,2431	1,6768
Moyenne:	1,3681	0,2284	1,1638
Maximum:	4,0000	0,5000	3,0000
Minimum:	0,2147	0,1112	0,0000

Modèle Servat-SWMM					
MES max/h					
	a2	b2	c2	d2	e2
Départ:	1	1	0,5	0,18	1
1	1,1207	1,0546	0,6854	0,1902	1,2996
2	0,9295	0,9647	0,4502	0,1764	0,2304
3	1,0196	1,0098	0,5128	0,1805	1,2497
4	1,0632	1,0329	0,5717	0,1894	1,3477
5	1,2216	1,1141	0,8209	0,2083	1,8209
6	1,3129	1,1611	0,8419	0,1988	4,7977
7	1,3514	1,1943	0,9555	0,2345	1,562
8	1,0142	1,0071	0,5099	0,1802	1,3851
9	1,3384	1,2019	0,9061	0,2157	1,8574
10	1,4406	1,2894	1,1052	0,2396	1,0756
11	2,0179	1,6145	1,4079	0,2809	2,6054
12	0,9453	0,9725	0,4396	0,1781	0,5856
13	0,991	0,9954	0,4903	0,1791	0,9381
14	0,9725	0,9863	0,4733	0,1778	0,463
15	1,0114	1,0058	0,5132	0,1815	1,0688
16	1,2485	1,1173	0,8723	0,2118	1,5904
17	1,2614	1,1262	0,8524	0,2191	1,7915
18	0,9638	0,9815	0,4535	0,1777	0,792
19	0,9999	0,9999	0,4999	0,18	0,9996
20	1,0592	1,0296	0,5418	0,1875	1,641
21	0,9908	0,9954	0,4938	0,1787	0,8674
22	1,2885	1,141	0,7518	0,2162	2,571
23	1,0112	1,0056	0,5081	0,1813	1,1117
24	1,0019	1,001	0,5024	0,1803	1,014
25	1,1797	1,0997	0,7563	0,1958	1,144
26	1,4626	1,2793	0,9995	0,2451	1,9501
27	1,3338	1,1854	0,9577	0,2198	1,3395
28	1,2827	1,1518	0,9431	0,2161	1,076
29	1,8751	1,5664	1,312	0,3049	2,6235
30	1,4779	1,2441	0,9356	0,2118	1,8135
31	1,1205	1,0665	0,6533	0,1926	1,4227
32	1,2891	1,1496	0,9179	0,2224	1,6037
33	1,4699	1,3078	1,1045	0,2325	1,6405
34	1,825	1,5257	1,2291	0,2544	4,2875
35	1,3341	1,1751	0,7855	0,2103	2,9177
36	0,9653	0,9826	0,4569	0,1795	0,6336
37	1,2908	1,1759	0,9422	0,2194	1,8313
38	1,3358	1,1789	0,8002	0,2115	2,7444
Moyenne:	1,2321	1,134	0,7619	0,2068	1,6235
Maximum:	2,0179	1,6145	1,4079	0,3049	4,7977
Minimum:	0,9295	0,9647	0,4396	0,1764	0,2304

SWMM-Servat						
MESmax/h						
	a3	b3	c3	d3	e3	f3
Départ:	1	1	0,4	0,8	0,5	1
1	0,8589	0,9577	0,2256	0,5568	0,2400	0,9937
2	0,6114	0,8915	0,2070	0,4970	0,0000	0,2517
3	0,7604	0,9233	0,2411	0,4832	0,0811	1,1799
4	0,7462	0,9010	0,1819	0,5670	0,1263	1,2065
5	0,8944	0,9832	0,2592	0,6947	0,3148	0,9465
6	0,9788	0,9821	0,2838	0,7206	0,3513	1,0532
7	0,9193	0,9708	0,2609	0,7054	0,3213	1,0010
8	0,8687	0,9637	0,2691	0,6000	0,2383	0,8921
9	0,9459	0,9597	0,2613	0,6882	0,2965	1,0639
10	0,9590	0,9782	0,2752	0,6943	0,3446	1,0006
11	0,9602	0,9834	0,2856	0,6852	0,3459	1,0017
12	0,6586	0,9010	0,1696	0,4493	0,0000	0,6352
13	0,7130	0,9121	0,1903	0,6509	0,0787	0,9598
14	0,6369	0,8934	0,1759	0,3914	0,0000	0,4837
15	0,6886	0,8993	0,1682	0,6077	0,0790	1,0828
16	1,0007	1,0036	0,3029	0,8033	0,4054	0,9933
17	0,9738	0,9752	0,2749	0,7707	0,3524	1,0333
18	0,6571	0,8981	0,1477	0,3559	0,0000	0,8731
19	0,7162	0,9142	0,1878	0,4202	0,0804	0,9912
20	0,7539	0,9065	0,2251	0,2314	0,1015	1,5072
21	0,5874	0,8763	0,2001	0,5035	0,0000	0,8539
22	0,8448	0,9531	0,2509	0,5630	0,2402	0,9916
23	0,7024	0,9092	0,2226	0,3019	0,0808	1,0137
24	0,6832	0,9031	0,1651	0,3822	0,0804	1,0039
25	0,8170	0,9646	0,2279	0,4914	0,2277	0,9759
26	0,9145	0,9578	0,2582	0,6484	0,2879	1,0193
27	0,8731	0,9871	0,2603	0,6365	0,3078	0,9846
28	0,9468	0,9701	0,2616	0,6535	0,3257	1,0019
29	0,9568	0,9876	0,2879	0,7327	0,3599	0,9989
30	0,8238	0,9622	0,2535	0,4973	0,2277	0,9760
31	0,8322	0,9596	0,2351	0,6480	0,2353	0,9132
32	1,0080	0,9836	0,2899	0,7857	0,3821	1,0248
33	0,9618	0,9802	0,2785	0,7106	0,3446	1,0053
34	0,9830	0,9911	0,2930	0,7666	0,3722	1,0062
35	0,9035	0,9537	0,2598	0,5723	0,2519	1,0817
36	0,6853	0,9072	0,1643	0,4636	0,0000	0,6802
37	1,0040	0,9958	0,2980	0,7967	0,3964	1,0117
38	0,9393	0,9643	0,2697	0,7049	0,2938	1,0806
Moyenne:	0,8360	0,9475	0,2387	0,5903	0,2150	0,9677
Maximum:	1,0080	1,0036	0,3029	0,8033	0,4054	1,5072
Minimum:	0,5874	0,8763	0,1477	0,2314	0,0000	0,2517

Modèle Servat-Servat						
MESmax/h						
	a4	b4	c4	d4	e4	f4
Départ:	1	1	0,4	0,8	0,5	1
1	0,9229	0,8466	0,2063	0,4790	0,1700	2,0148
2	0,6518	0,8749	0,2538	0,5326	0,0000	0,2380
3	0,8053	0,9189	0,3163	0,5478	0,1033	1,0671
4	0,7590	0,8795	0,2060	0,5884	0,1116	1,1754
5	0,8746	0,9495	0,2845	0,6420	0,3002	0,9971
6	0,9869	0,9321	0,3385	0,6388	0,3457	1,2432
7	0,8902	0,9308	0,2900	0,6553	0,3120	1,0116
8	0,8154	0,9198	0,3128	0,4874	0,1051	1,2814
9	0,8555	0,9599	0,3117	0,6535	0,2880	0,9712
10	0,9839	0,9112	0,3159	0,6114	0,3456	1,0048
11	1,0058	0,9361	0,3509	0,6021	0,3543	1,0259
12	0,7088	0,8911	0,2015	0,5043	0,0000	0,6190
13	0,7145	0,8849	0,2048	0,6529	0,0000	1,0024
14	0,6948	0,8835	0,2147	0,4601	0,0000	0,4733
15	0,7426	0,8958	0,2101	0,6468	0,1006	0,9928
16	0,8999	0,9932	0,3316	0,7554	0,3856	0,9639
17	0,9568	0,9064	0,2948	0,7343	0,3330	1,1236
18	0,7170	0,8900	0,1719	0,4361	0,0000	0,8528
19	0,7396	0,8898	0,2093	0,4435	0,0000	1,0896
20	0,7965	0,8957	0,2901	0,3348	0,1183	1,2797
21	0,6490	0,8639	0,2515	0,5527	0,0000	0,8272
22	0,9472	0,8697	0,2792	0,4948	0,1784	1,6951
23	0,7139	0,8825	0,2663	0,3190	0,0000	1,0745
24	0,6881	0,8728	0,1591	0,3895	0,0000	1,0582
25	0,9794	0,8383	0,2405	0,4526	0,1969	1,4035
26	0,8231	0,9566	0,3103	0,6120	0,2827	0,9783
27	0,8783	0,9508	0,2964	0,5735	0,3003	0,9997
28	0,9298	0,9256	0,2894	0,5790	0,3248	1,0044
29	0,9362	0,9540	0,3510	0,6535	0,3636	1,0064
30	0,9794	0,8816	0,2965	0,4571	0,1950	1,3385
31	0,8409	0,8828	0,2268	0,5822	0,1314	1,5478
32						
33	0,9436	0,9404	0,3158	0,7327	0,3684	1,0284
34	0,9727	0,9249	0,3252	0,6349	0,3401	1,0357
35	0,9522	0,9610	0,3611	0,6985	0,3678	1,0247
36	0,9378	0,9057	0,3107	0,5285	0,2239	1,3654
37	0,7387	0,8993	0,1961	0,5226	0,0000	0,6693
38	0,8577	0,9587	0,3336	0,6783	0,2878	0,9497
Moyenne:	0,8457	0,9097	0,2737	0,5640	0,1874	1,0658
Maximum:	1,0058	0,9932	0,3611	0,7554	0,3856	2,0148
Minimum:	0,6490	0,8383	0,1591	0,3190	0,0000	0,2380

ANNEXE V.4 - Résultat du "Jackknife" pour MESmax/h

Modèle SWMM-SWMM

38 val	MES max/h					
	a=	b=	c=	e ² =	r=	R2=
	0,6150	0,6250	1,0029	10477	0,2433	-0,1128
1	0,7279	0,6250	0,9208	10096	0,2804	-0,0442
2	0,6127	0,6250	1,0215	10691	0,2262	-0,1379
3	0,6172	0,6250	0,9890	10729	0,2352	-0,1180
4	0,6182	0,6250	0,9980	10713	0,2302	-0,1310
5	0,6269	0,6250	0,9920	10709	0,2392	-0,1096
6	0,6762	0,6250	0,3792	6779	0,3180	-0,2004
7	0,6143	0,6250	0,9968	10727	0,2364	-0,1153
8	0,6305	0,6250	0,9065	10687	0,2431	-0,1104
9	0,6128	0,6250	0,9920	10705	0,2409	-0,1077
10	0,5764	0,6250	1,0511	9945	0,2595	-0,0757
11	0,6061	0,6250	0,9863	8351	0,3393	0,0170
12	0,6132	0,6250	1,0643	10600	0,2491	-0,1107
13	0,6168	0,6250	1,0152	10693	0,2397	-0,1208
14	0,5932	0,6250	1,1703	10522	0,2535	-0,0989
15	0,6198	0,6250	1,0044	10685	0,2376	-0,1254
16	0,6201	0,6250	0,9914	10729	0,2170	-0,1271
17	0,6220	0,6250	0,9905	10718	0,2444	-0,1124
18	0,6263	0,6250	1,0708	10481	0,2613	-0,0922
19	0,6206	0,6250	1,0010	10684	0,2365	-0,1273
20	0,6166	0,6250	0,9922	10729	0,2260	-0,1270
21	0,6159	0,6250	0,9979	10728	0,2207	-0,1367
22	0,6160	0,6250	0,9915	10722	0,2298	-0,1206
23	0,6161	0,6250	0,9967	10730	0,2245	-0,1317
24	0,6207	0,6250	1,0161	10656	0,2448	-0,1170
25	0,6417	0,6250	0,9666	10631	0,2551	-0,1038
26	0,6144	0,6250	0,9948	10709	0,2315	-0,1159
27	0,5965	0,6250	1,0167	10631	0,2377	-0,1082
28	0,5525	0,6250	1,0848	10491	0,1873	-0,1617
29	0,6129	0,6250	0,9936	10370	0,2551	-0,0737
30	0,6147	0,6250	0,9933	10704	0,2319	-0,1147
31	0,6226	0,6250	1,0029	10687	0,2460	-0,1127
32	0,6136	0,6250	0,9974	10729	0,2403	-0,1104
33	0,5883	0,6250	1,0106	9918	0,2624	-0,0744
34	0,6170	0,6250	0,9609	10116	0,2696	-0,0601
35	0,6169	0,6250	0,9802	10681	0,2382	-0,1073
36	0,5974	0,6250	1,2770	10282	0,2629	-0,0650
37	0,5943	0,6250	1,0042	10633	0,2192	-0,1293
38	0,6151	0,6250	0,9913	10722	0,2386	-0,1124
moyennes	0,6167	0,6250	0,9950	10424	0,2450	-0,1087

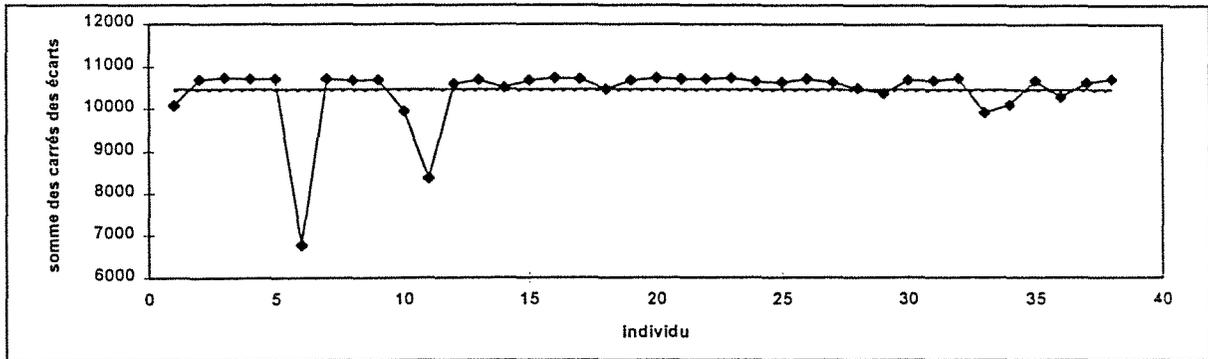


Figure V.4.1 : Variation du carré des écarts après suppression d'un individu sur l'échantillon de MESmax/h

Erreur! Aucune application n'a été spécifiée.

Figure V.4.2 : Variation du coefficient de corrélation après suppression d'un individu sur l'échantillon de MESmax/h

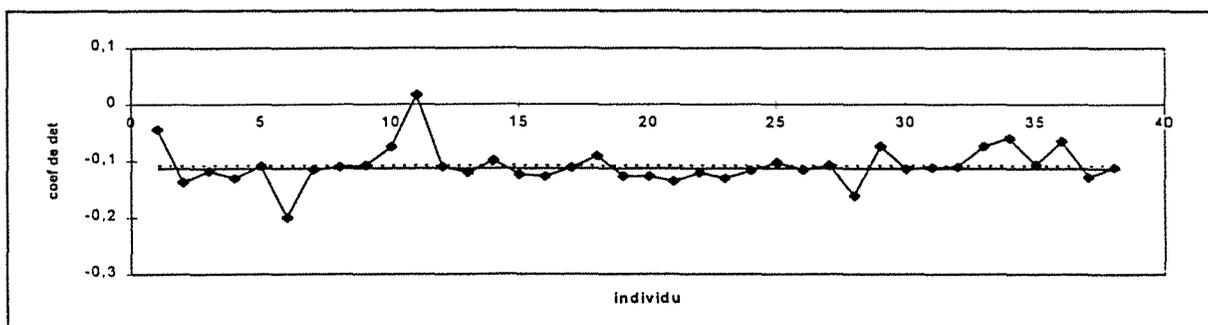


Figure V.4.3 : Variation du coefficient de détermination après suppression d'un individu sur l'échantillon de MESmax/h

ANNEXE V.5 - Détermination des bornes de variation des paramètres - Calage des modèles pour MESmoy

Modèle SWMM-SWMM			
MESmoy			
	a1	b1	c1
Départ:	1	0,18	1
1	0,0745	0,1149	0,4978
2	0,1734	0,1405	0,4662
3	0,1573	0,1580	0,4558
4	0,7373	0,1402	0,4977
5	0,5450	0,1166	0,4986
6	0,2534	0,1297	0,4832
7	0,7641	0,1429	0,4996
8	0,3099	0,1691	0,4292
9	0,2936	0,0933	0,4968
10	0,8415	0,1583	0,5000
11	0,9332	0,1732	0,4997
12	0,0681	0,1461	0,4873
13	0,1586	0,1035	0,4882
14	0,2549	0,1134	0,4691
15	0,3377	0,0732	0,4969
16	0,4037	0,0948	0,4990
17	0,5333	0,1056	0,4992
18	0,0000	0,1173	1,5945
19	0,1168	0,0984	0,4950
20	0,8857	0,1653	0,4959
21	0,8363	0,1569	0,4920
22	0,5679	0,1207	0,4957
23	0,3996	0,1053	0,4815
24	0,2991	0,0743	0,4946
25	0,1098	0,1008	0,4991
26	0,7629	0,1459	0,4890
27	0,4008	0,1014	0,4993
28	0,4302	0,1034	0,4999
29	1,8107	0,2965	0,5054
30	0,2283	0,1265	0,4967
31	0,1372	0,0869	0,4949
32	0,7326	0,1403	0,4995
33	0,5427	0,1241	0,4989
34	1,1470	0,1934	0,5023
35	0,4417	0,1270	0,4907
36	0,0000	0,1667	0,7867
37	0,4319	0,0984	0,4982
38	0,5297	0,1324	0,4935
Moyenne:	0,4645	0,1304	0,5284
Maximum:	1,8107	0,2965	1,5945
Minimum:	0,0000	0,0732	0,4292

Modèle Servat-SWMM					
MES moy					
	a2	b2	c2	d2	e2
Départ:	1	1	0,5	0,18	1
1	1,0616	1,0342	0,6545	0,1853	0,5096
2	1,1020	1,0563	0,6662	0,1852	0,5791
3	1,0902	1,0526	0,6447	0,1823	0,5696
4	1,1910	1,0922	0,8780	0,2086	0,5998
5	1,1440	1,0808	0,8410	0,1984	0,5405
6	1,1338	1,0729	0,7672	0,1880	0,6191
7	1,1820	1,0898	0,8861	0,2083	0,5278
8	1,1228	1,0672	0,6985	0,1820	0,7439
9	1,1245	1,0687	0,7539	0,1931	0,5283
10	1,1932	1,0986	0,9105	0,2062	0,5037
11	1,2486	1,1298	0,9232	0,2049	0,5355
12	1,0622	1,0402	0,6315	0,1822	0,5118
13	1,0988	1,0422	0,6852	0,1895	0,5747
14	1,1191	1,0630	0,7235	0,1896	0,6848
15	1,1144	1,0605	0,7343	0,1955	0,5552
16	1,1159	1,0734	0,7920	0,1948	0,5160
17	1,1382	1,0848	0,8238	0,2007	0,5250
18	1,0384	1,0279	0,5908	0,1825	0,4946
19	1,0758	1,0464	0,6586	0,1869	0,5115
20	1,2486	1,1233	0,8926	0,2115	0,7349
21	1,2407	1,1100	0,8648	0,2137	0,8158
22	1,1800	1,0998	0,8255	0,2026	0,5693
23	1,1484	1,0817	0,7432	0,1970	0,6109
24	1,1077	1,0582	0,7271	0,1943	0,5656
25	1,0842	1,0315	0,6800	0,1874	0,5097
26	1,2059	1,1009	0,8830	0,2091	0,5460
27	1,1306	1,0808	0,8015	0,1956	0,5089
28	1,1208	1,0748	0,8045	0,1955	0,5021
29	1,3057	1,1910	1,0481	0,2239	0,5456
30	1,1310	1,0720	0,7389	0,1887	0,5170
31	1,0799	1,0461	0,6737	0,1883	0,5206
32	1,1657	1,0808	0,8805	0,2043	0,5312
33	1,1666	1,0932	0,8471	0,1987	0,5228
34	1,2689	1,1502	0,9567	0,2044	0,5991
35	1,1693	1,1027	0,8057	0,1954	0,5664
36	1,0032	1,0027	0,5078	0,1800	0,4952
37	1,1246	1,0776	0,8012	0,1969	0,5274
38	1,1879	1,1020	0,8346	0,1976	0,5813
Moyenne:	1,1428	1,0779	0,7784	0,1960	0,5632
Maximum:	1,3057	1,1910	1,0481	0,2239	0,8158
Minimum:	1,0032	1,0027	0,5078	0,1800	0,4946

SWMM-Servat						
MESmoy						
	a3	b3	c3	d3	e3	f3
Départ:	1	1	0,4	0,8	0,5	1
1	0,9215	0,9825	0,2390	0,6749	0,3177	0,4973
2	0,9306	0,9430	0,2313	0,7026	0,2563	0,5984
3	0,8298	0,9724	0,2253	0,6267	0,2255	0,4421
4	1,0448	1,0093	0,3286	0,8318	0,4373	0,5025
5	1,0263	1,0105	0,3234	0,8362	0,4293	0,4999
6	0,8994	0,9916	0,2477	0,6529	0,3098	0,4763
7	1,0272	1,0135	0,3247	0,8348	0,4289	0,4998
8	0,9015	0,9569	0,2334	0,6118	0,2479	0,5494
9	0,9671	0,9755	0,2646	0,7424	0,3466	0,5046
10	1,0050	0,9896	0,2941	0,7859	0,3926	0,5001
11	0,9287	0,9802	0,2582	0,6385	0,3239	0,4998
12	0,9605	0,9298	0,2225	0,6874	0,2660	0,6531
13	0,9781	0,9746	0,2695	0,7778	0,3522	0,5250
14	0,9471	0,9724	0,2554	0,7238	0,3235	0,5255
15	0,9924	0,9823	0,2820	0,7856	0,3759	0,5114
16	1,0551	1,0252	0,3527	0,8392	0,4643	0,4993
17	1,0561	1,0209	0,3474	0,8341	0,4554	0,5005
18	0,9246	0,9370	0,2075	0,6439	0,2580	0,5872
19	0,9916	0,9106	0,2196	0,6534	0,2767	0,5758
20	0,8958	0,9835	0,2525	0,6356	0,3137	0,4918
21	0,9791	0,9939	0,2885	0,7852	0,3800	0,4986
22	0,9471	0,9681	0,2537	0,6895	0,3255	0,5054
23	0,9078	0,9401	0,2209	0,5744	0,2554	0,5386
24	0,9498	0,9635	0,2451	0,7038	0,3264	0,5165
25	0,9435	0,9487	0,2256	0,6128	0,2954	0,5053
26	1,0012	0,9825	0,2866	0,7749	0,3814	0,5021
27	0,9441	0,9969	0,2680	0,7227	0,3564	0,4990
28	0,9811	0,9861	0,2773	0,7460	0,3726	0,5001
29	1,0000	1,0138	0,3107	0,8270	0,4161	0,4993
30	0,9392	0,9379	0,2247	0,5602	0,2635	0,5117
31	0,9473	0,9691	0,2480	0,7306	0,3248	0,5099
32	1,0813	1,0370	0,3753	0,8695	0,4870	0,4997
33	0,9900	0,9763	0,2759	0,7441	0,3654	0,5021
34	1,0027	0,9957	0,2977	0,7951	0,3959	0,5012
35	0,9575	0,9509	0,2444	0,6470	0,3004	0,5211
36	0,8498	0,9736	0,2033	0,6604	0,2305	0,4158
37	1,0254	1,0132	0,3250	0,8276	0,4304	0,4990
38	0,9853	0,9878	0,2847	0,7759	0,3731	0,5034
Moyenne:	0,9662	0,9789	0,2693	0,7254	0,3443	0,5123
Maximum:	1,0813	1,0370	0,3753	0,8695	0,4870	0,6531
Minimum:	0,8298	0,9106	0,2033	0,5602	0,2255	0,4158

		Modèle Servat-Servat					
		MESmoy					
		a4	b4	c4	d4	e4	f4
Départ:		1	1	0,4	0,8	0,5	1
1		0,9016	0,9565	0,2415	0,6262	0,3214	0,4973
2		0,9123	0,9051	0,2563	0,6860	0,2372	0,5984
3		0,8852	0,8838	0,2224	0,5754	0,1466	0,4421
4		0,9701	0,9696	0,3452	0,7668	0,4390	0,5025
5		0,9962	0,9348	0,3360	0,7476	0,4337	0,4999
6		0,9043	0,9499	0,2692	0,5980	0,3065	0,4763
7		0,9873	0,9450	0,3373	0,7524	0,4382	0,4998
8		0,8714	0,8916	0,2175	0,5127	0,1372	0,5494
9		0,9730	0,8955	0,2783	0,6918	0,3434	0,5046
10		0,9411	0,9762	0,3201	0,6887	0,4089	0,5001
11		0,9424	0,9247	0,2904	0,5681	0,3292	0,4998
12		0,8481	0,9887	0,2534	0,6770	0,2713	0,6531
13		0,9676	0,9022	0,2812	0,7523	0,3395	0,5250
14		0,9171	0,9388	0,2761	0,6818	0,3146	0,5255
15		0,9455	0,9377	0,2922	0,7515	0,3734	0,5114
16		0,9708	0,9927	0,3592	0,7835	0,4576	0,4993
17		0,9570	1,0028	0,3564	0,7825	0,4554	0,5005
18		0,9255	0,8772	0,2080	0,6218	0,2468	0,5872
19		0,8466	0,9782	0,2415	0,6324	0,2796	0,5758
20		0,9063	0,9357	0,2808	0,5737	0,3143	0,4918
21		0,9483	0,9391	0,3129	0,7384	0,3701	0,4986
22		0,9322	0,9200	0,2752	0,6345	0,3257	0,5054
23		1,0193	0,7909	0,2127	0,5123	0,2120	0,5386
24		0,9218	0,9241	0,2545	0,6585	0,3309	0,5165
25		0,8825	0,9603	0,2374	0,5719	0,3010	0,5053
26		0,9040	0,9918	0,3124	0,7031	0,3879	0,5021
27		0,9943	0,8778	0,2793	0,6470	0,3651	0,4990
28		1,0099	0,8670	0,2859	0,6580	0,3874	0,5001
29		0,9749	0,9591	0,3456	0,7216	0,4270	0,4993
30		0,9464	0,8787	0,2455	0,5277	0,2578	0,5117
31		0,9269	0,9233	0,2572	0,6948	0,3220	0,5099
32		1,0093	0,9718	0,3850	0,7930	0,4863	0,4997
33		0,9556	0,9346	0,2985	0,6681	0,3723	0,5021
34		0,9280	0,9852	0,3364	0,7181	0,3933	0,5012
35		0,8842	0,9551	0,2745	0,6025	0,2992	0,5211
36		0,8222	0,9102	0,1409	0,5943	0,1099	0,4158
37		0,9853	0,9442	0,3324	0,7600	0,4313	0,4990
38		0,9449	0,9483	0,3119	0,7224	0,3646	0,5034
Moyenne:		0,9358	0,9334	0,2832	0,6683	0,3352	0,5123
Maximum:		1,0193	1,0028	0,3850	0,7930	0,4863	0,6531
Minimum:		0,8222	0,7909	0,1409	0,5123	0,1099	0,4158

ANNEXE V.6 - Résultat du "Jacknife" pour MESmoy

Modèle SWMM-SWMM

38 val	MES moy					
	a=	b=	c=	e ² =	r=	R ² =
	0,1413	0,3706	0,2146	152900	0,5113	0,0721
1	0,1706	0,3706	0,2146	119551	0,6133	0,2934
2	0,1413	0,3706	0,2146	157010	0,4995	0,0473
3	0,1413	0,3706	0,2146	154649	0,5131	0,0861
4	0,1405	0,3706	0,2146	154640	0,5131	0,0861
5	0,1329	0,3706	0,2146	143727	0,4749	-0,0185
6	0,1406	0,3706	0,2146	156246	0,5115	0,0766
7	0,1398	0,3706	0,2146	152487	0,5174	0,0945
8	0,1412	0,3706	0,2146	156558	0,5045	0,0643
9	0,1414	0,3706	0,2146	157022	0,5108	0,0672
10	0,1361	0,3706	0,2146	133076	0,5418	0,1169
11	0,1408	0,3706	0,2146	152816	0,5157	0,0969
12	0,1422	0,3706	0,2146	156250	0,5143	0,0631
13	0,1417	0,3706	0,2146	156790	0,5099	0,0589
14	0,1411	0,3706	0,2146	156843	0,5089	0,0683
15	0,1416	0,3706	0,2146	156888	0,5096	0,0600
16	0,1390	0,3706	0,2146	156410	0,4626	-0,0046
17	0,1401	0,3706	0,2146	156096	0,5103	0,0743
18	0,1459	0,3706	0,2146	150637	0,5378	0,0960
19	0,1422	0,3706	0,2146	156138	0,5134	0,0594
20	0,1412	0,3706	0,2146	156163	0,5034	0,0662
21	0,1413	0,3706	0,2146	156696	0,4997	0,0549
22	0,1411	0,3706	0,2146	156623	0,5044	0,0634
23	0,1413	0,3706	0,2146	156988	0,4988	0,0472
24	0,1419	0,3706	0,2146	156726	0,5125	0,0642
25	0,1479	0,3706	0,2146	149914	0,5391	0,1118
26	0,1408	0,3706	0,2146	155163	0,5105	0,0815
27	0,1398	0,3706	0,2146	156235	0,5048	0,0642
28	0,1359	0,3706	0,2146	154000	0,4429	-0,0492
29	0,1407	0,3706	0,2146	144113	0,5365	0,1397
30	0,1413	0,3706	0,2146	156992	0,5044	0,0571
31	0,1432	0,3706	0,2146	155067	0,5211	0,0724
32	0,1331	0,3706	0,2146	133420	0,5151	0,0466
33	0,1393	0,3706	0,2146	152575	0,5156	0,0884
34	0,1407	0,3706	0,2146	149754	0,5233	0,1134
35	0,1411	0,3706	0,2146	156571	0,5048	0,0647
36	0,1438	0,3706	0,3394	151274	0,5291	0,0910
37	0,1398	0,3706	0,2146	156490	0,4983	0,0532
38	0,1410	0,3706	0,2146	155961	0,5078	0,0738
moyennes	0,1415	0,3706	0,2179	152488	0,5119	0,0734

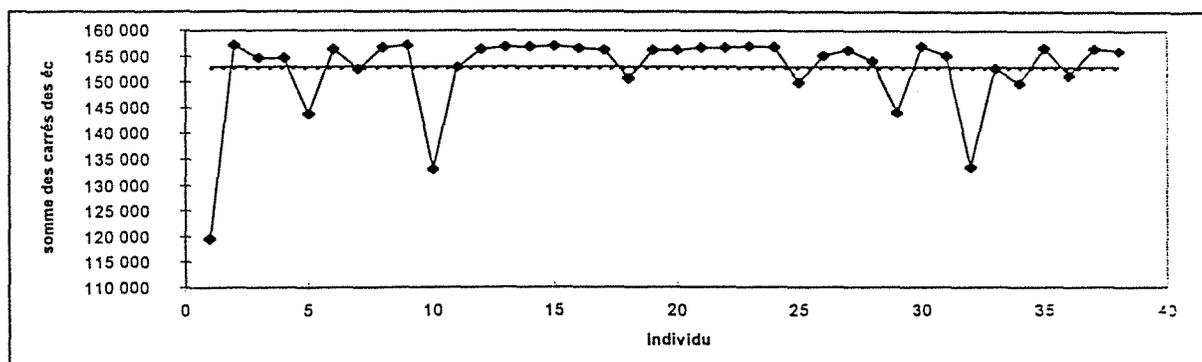


Figure V.6.1 : Variation du carré des écarts après suppression d'un individu sur l'échantillon de MESmoy

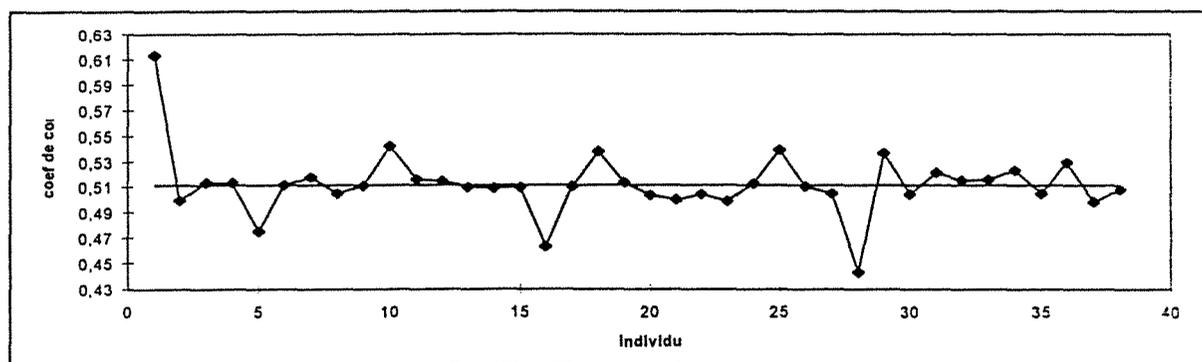


Figure V.6.2 : Variation du coefficient de corrélation après suppression d'un individu sur l'échantillon de MESmoy

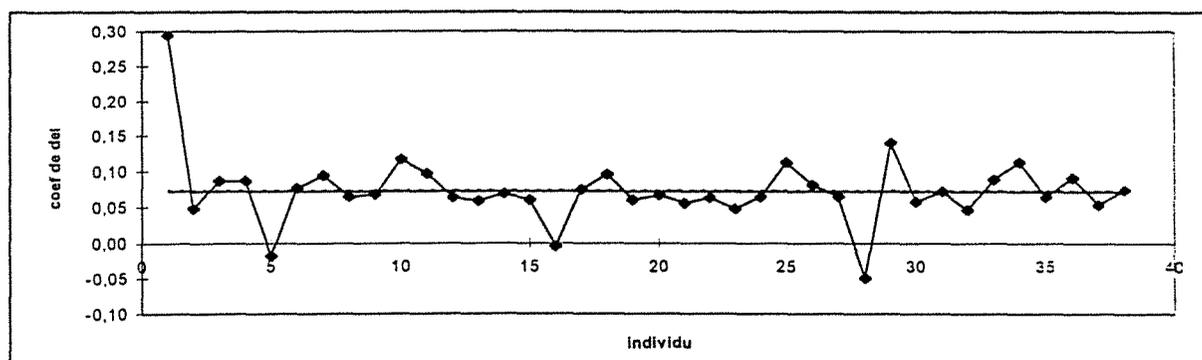


Figure V.6.3 : Variation du coefficient de détermination après suppression d'un individu sur l'échantillon de MESmoy

ANNEXE V.7 - Détermination des bornes de variation des paramètres - Calage des modèles pour MESmax

Modèle SWMM-SWMM			
MESmax			
	a1	b1	c1
Départ:	1	0,18	1
1	0,1205	0,1039	0,9905
2	0,1494	0,1363	0,8278
3	0,0500	0,1564	0,8225
4	0,5492	0,1079	0,9890
5	0,6037	0,1290	0,9918
6	0,3420	0,1394	0,9246
7	0,5701	0,1144	0,9935
8	0,4229	0,1709	0,7041
9	0,3630	0,1069	0,9845
10	0,5612	0,1228	0,9991
11	0,7526	0,1546	0,9938
12	0,1829	0,1516	0,9441
13	0,1592	0,0965	0,9449
14	0,0500	0,1059	0,8625
15	0,2549	0,0721	0,9690
16	0,4188	0,1003	0,9945
17	0,4573	0,0955	0,9931
18	0,0500	0,2749	2,0614
19	0,0500	0,3323	1,8018
20	1,0130	0,1818	1,0026
21	0,6715	0,1325	0,9294
22	0,5382	0,1171	0,9757
23	0,5653	0,1331	0,9107
24	0,3437	0,0806	0,9757
25	0,0500	0,3845	1,1928
26	0,6554	0,1284	0,9945
27	0,3714	0,0968	0,9965
28	0,4942	0,1107	0,9994
29	2,1847	0,3502	1,0395
30	0,1590	0,1233	0,9816
31	0,0500	0,1426	1,1776
32	0,6837	0,1321	0,9974
33	0,4297	0,1133	0,9923
34	0,7812	0,1595	0,9839
35	0,4939	0,1310	0,9585
36	0,0500	0,1610	0,3789
37	0,3955	0,0883	0,9925
38	0,5401	0,1334	0,9681
Moyenne:	0,4363	0,1466	1,0063
Maximum:	2,1847	0,3845	2,0614
Minimum:	0,0500	0,0721	0,3789

Modèle Servat-SWMM					
MES max					
	a2	b2	c2	d2	e2
Départ:	1	1	0,5	0,18	1
1	1,0043	0,7288	0,7439	0,1800	1,3261
2	0,9486	0,9212	0,6077	0,1773	1,2123
3	0,8825	0,8821	0,1993	0,1770	0,9943
4	0,9925	0,9408	0,8777	0,1789	1,0435
5	0,9899	0,9900	0,9000	0,1787	0,9998
6	0,9934	0,9122	0,8531	0,1795	1,1801
7	0,9818	1,0266	0,8821	0,1772	0,9923
8	0,9729	0,9627	0,7987	0,1796	1,0672
9	0,9951	0,8945	0,8450	0,1794	1,0609
10	0,9858	1,0060	0,8922	0,1781	0,9995
11	0,9920	0,9987	0,9484	0,1792	0,9982
12	0,9739	0,9895	0,7925	0,1791	0,9750
13	0,9808	0,8309	0,6706	0,1779	1,6989
14	0,9011	0,9008	0,1990	0,1720	1,0275
15	0,9833	0,8896	0,7490	0,1777	1,1959
16	0,9952	0,8990	0,8451	0,1793	1,0276
17	0,9978	0,8829	0,8519	0,1796	1,0506
18	0,9814	0,9029	0,7403	0,1787	1,1458
19	0,9943	0,7779	0,7100	0,1792	1,4604
20	1,0027	1,0071	0,9994	0,1804	0,9918
21	0,9879	0,9759	0,9025	0,1783	1,0312
22	0,9927	0,9374	0,8813	0,1790	1,0542
23	0,9790	1,0124	0,8895	0,1776	0,9329
24	0,9783	0,9750	0,8016	0,1771	1,0034
25	0,9957	0,7753	0,7159	0,1793	1,1213
26	0,9959	0,9500	0,9153	0,1794	1,0156
27	0,9927	0,9094	0,8387	0,1791	1,0144
28	0,9925	0,9398	0,8649	0,1790	1,0014
29	1,0202	1,0279	1,1586	0,1829	0,9995
30	0,9823	0,8841	0,7515	0,1786	1,0668
31	0,9731	0,8778	0,6498	0,1771	1,2495
32	0,9957	0,9567	0,9141	0,1794	1,0062
33	0,9886	0,9567	0,8641	0,1787	1,0079
34	1,0013	0,9575	0,9596	0,1800	1,0299
35	0,9937	0,9344	0,8854	0,1793	1,0678
36	0,9127	0,9124	0,1999	0,1788	1,0251
37	0,9896	0,9282	0,8292	0,1786	1,0311
38	0,9848	0,9960	0,8960	0,1786	0,9891
Moyenne:	0,9817	0,9277	0,7901	0,1787	1,0814
Maximum:	1,0202	1,0279	1,1586	0,1829	1,6989
Minimum:	0,8825	0,7288	0,1990	0,1720	0,9329

SWMM-Servat						
MESmax						
	a3	b3	c3	d3	e3	f3
Départ:	1	1	0,4	0,8	0,5	1
1	0,9840	0,9797	0,2723	0,7480	0,3658	1,0275
2	0,8919	0,9591	0,2248	0,7026	0,2563	1,1305
3	0,7482	0,9242	0,1457	0,4819	0,0797	0,9654
4	1,0268	1,0164	0,3274	0,8276	0,4324	0,9852
5	1,0679	1,0149	0,3548	0,8792	0,4641	1,0169
6	0,9511	0,9974	0,2727	0,7295	0,3568	0,9273
7	1,0252	1,0122	0,3244	0,8317	0,4263	0,9986
8	0,9133	0,9698	0,2422	0,6523	0,2806	1,0622
9	1,0155	1,0110	0,2989	0,8154	0,3963	0,9967
10	1,0127	0,9771	0,2882	0,7744	0,3866	1,0018
11	0,9745	0,9643	0,2602	0,6636	0,3357	1,0165
12	0,9932	0,9889	0,2873	0,7831	0,3798	1,0568
13	0,9951	0,9866	0,2865	0,7911	0,3808	1,1053
14	0,8602	0,9585	0,1991	0,6411	0,2405	0,8918
15	0,9985	0,9897	0,2907	0,7932	0,3886	1,0548
16	1,0887	1,0307	0,3823	0,8570	0,4936	1,0138
17	1,0706	1,0221	0,3608	0,8405	0,4659	1,0124
18	0,9709	0,9871	0,2725	0,7568	0,3607	1,0172
19	0,9377	0,9746	0,2463	0,7076	0,3223	1,0168
20	0,9428	0,9951	0,2737	0,7177	0,3568	0,9625
21	0,9967	0,9888	0,2899	0,7888	0,3847	1,0703
22	0,9407	0,9972	0,2711	0,7355	0,3565	0,9627
23	0,9484	0,9689	0,2546	0,6830	0,3250	1,0686
24	0,9758	0,9892	0,2777	0,7638	0,3723	1,0102
25	0,9170	0,9848	0,2373	0,6514	0,3170	0,9911
26	0,9964	1,0010	0,2981	0,7973	0,3974	0,9983
27	0,9892	0,9844	0,2806	0,7579	0,3763	1,0056
28	1,0008	1,0051	0,3042	0,8094	0,4047	0,9996
29	1,0608	1,0224	0,3437	0,9046	0,4623	1,0004
30	0,9701	0,9246	0,2225	0,5768	0,2730	1,1538
31	0,9444	0,9688	0,2427	0,7293	0,3234	1,0808
32	1,1065	1,0345	0,3946	0,8815	0,5020	1,0118
33	0,9684	1,0017	0,2844	0,7651	0,3784	0,9911
34	1,0038	0,9956	0,2976	0,7958	0,3957	1,0108
35	0,9601	0,9789	0,2656	0,7129	0,3433	1,0227
36	0,8169	0,9444	0,1506	0,6018	0,1595	0,9823
37	1,0378	1,0214	0,3410	0,8421	0,4463	0,9861
38	1,0025	1,0081	0,3075	0,8106	0,4117	0,9787
Moyenne:	0,9764	0,9889	0,2809	0,7527	0,3631	1,0154
Maximum:	1,1065	1,0345	0,3946	0,9046	0,5020	1,1538
Minimum:	0,7482	0,9242	0,1457	0,4819	0,0797	0,8918

Modèle Servat-Servat						
MESmax						
Départ:	a4	b4	c4	d4	e4	f4
	1	1	0,4	0,8	0,5	1
1	0,9829	0,8927	0,2757	0,6760	0,3725	1,1463
2	0,8729	0,9692	0,2754	0,7084	0,2889	0,8332
3	0,7481	0,8992	0,1256	0,4822	0,0000	0,9885
4	0,9861	0,9463	0,3368	0,7653	0,4363	1,0657
5	0,9853	0,9874	0,3705	0,7769	0,4707	1,0033
6	0,9783	0,8978	0,2831	0,6386	0,3455	1,5307
7	0,9885	0,9409	0,3331	0,7529	0,4389	1,0166
8	0,8882	0,9677	0,2863	0,6356	0,2923	0,8785
9	0,9411	0,9778	0,3196	0,7321	0,4017	0,9975
10	0,9209	0,9974	0,3108	0,6839	0,4049	0,9992
11	0,9749	0,9021	0,2892	0,5899	0,3453	1,0414
12	0,9569	0,9455	0,3063	0,7298	0,3695	1,1409
13	0,9488	0,9415	0,2956	0,7610	0,3685	1,2112
14	0,7765	0,9103	0,1103	0,5448	0,0998	1,0144
15	0,9544	0,9376	0,2950	0,7565	0,3866	1,1513
16	1,0082	0,9743	0,3872	0,7955	0,4886	1,0178
17	0,9922	0,9727	0,3660	0,7878	0,4690	1,0171
18	0,9760	0,8922	0,2717	0,6908	0,3449	1,5346
19	0,9253	0,9273	0,2564	0,6633	0,3202	1,0976
20	1,0008	0,8855	0,2958	0,6286	0,3594	1,3048
21	0,9047	0,9911	0,3207	0,7475	0,3893	0,8873
22	1,0005	0,8736	0,2829	0,6625	0,3551	1,2768
23	0,9293	0,9250	0,2772	0,6235	0,3233	1,1509
24	0,9907	0,8784	0,2756	0,6910	0,3697	1,4745
25	0,9089	0,9495	0,2451	0,5993	0,3248	1,0064
26	0,9341	0,9789	0,3186	0,7185	0,4058	0,9970
27	0,9601	0,9376	0,2960	0,6752	0,3900	1,0124
28	0,9510	0,9813	0,3197	0,7027	0,4229	0,9999
29	1,0055	0,9741	0,3818	0,7773	0,4788	1,0036
30	0,8482	0,9817	0,2495	0,5484	0,2762	0,9740
31	0,9123	0,9397	0,2485	0,6962	0,3243	1,0923
32	0,9984	1,0069	0,4042	0,8019	0,5036	0,9975
33	0,9713	0,9265	0,3020	0,6833	0,3870	1,0286
34	0,9320	0,9838	0,3306	0,7194	0,3950	0,9888
35	0,9700	0,9052	0,2875	0,6443	0,3417	1,1914
36	0,8045	0,9216	0,1134	0,5890	0,1000	1,0118
37	0,9792	0,9704	0,3475	0,7707	0,4496	1,0191
38	0,9544	0,9691	0,3327	0,7457	0,4052	1,0173
Moyenne:	0,9411	0,9437	0,2927	0,6894	0,3591	1,0821
Maximum:	1,0082	1,0069	0,4042	0,8019	0,5036	1,5346
Minimum:	0,7481	0,8736	0,1103	0,4822	0,0000	0,8332

ANNEXE V.8 - Résultat du "Jacknife" pour MESmax

Modèle SWMM-SWMM

38 val	MES max					
	a=	b=	c=	e ² =	r=	R2=
	0,1429	0,4806	0,5002	470063	0,6545	0,3432
1	0,1664	0,4806	0,2842	388384	0,7117	0,4628
2	0,1430	0,4806	0,4944	482722	0,6472	0,3268
3	0,1429	0,4806	0,5025	482762	0,6460	0,3237
4	0,1428	0,4806	0,4963	482234	0,6525	0,3386
5	0,1318	0,4806	0,5369	390510	0,6414	0,2758
6	0,1443	0,4806	0,2842	464588	0,6690	0,3590
7	0,1425	0,4806	0,5056	481918	0,6539	0,3423
8	0,1455	0,4806	0,3037	477464	0,6613	0,3479
9	0,1425	0,4806	0,4970	481692	0,6547	0,3435
10	0,1409	0,4806	0,5358	474798	0,6553	0,3499
11	0,1426	0,4806	0,4975	474917	0,6546	0,3508
12	0,1431	0,4806	0,4484	480921	0,6570	0,3448
13	0,1429	0,4806	0,5212	481755	0,6535	0,3356
14	0,1421	0,4806	0,5710	481933	0,6518	0,3362
15	0,1433	0,4806	0,5148	480368	0,6547	0,3347
16	0,1405	0,4806	0,5271	480856	0,6129	0,2730
17	0,1432	0,4806	0,4975	482599	0,6559	0,3426
18	0,1437	0,4806	0,5619	478361	0,6574	0,3484
19	0,1435	0,4806	0,5097	479427	0,6562	0,3363
20	0,1432	0,4806	0,4657	476694	0,6537	0,3462
21	0,1430	0,4806	0,4896	482215	0,6463	0,3275
22	0,1428	0,4806	0,4925	481697	0,6500	0,3354
23	0,1430	0,4806	0,4838	481625	0,6485	0,3326
24	0,1431	0,4806	0,5132	482107	0,6555	0,3405
25	0,1517	0,4806	0,3724	441517	0,6939	0,3950
26	0,1426	0,4806	0,5001	480332	0,6519	0,3413
27	0,1427	0,4806	0,5033	482723	0,6525	0,3390
28	0,1317	0,4806	0,7024	453272	0,5867	0,2182
29	0,1421	0,4806	0,4954	386201	0,7092	0,4542
30	0,1429	0,4806	0,5006	482693	0,6485	0,3272
31	0,1449	0,4806	0,5284	467539	0,6671	0,3518
32	0,1359	0,4806	0,5862	436618	0,6509	0,3334
33	0,1419	0,4806	0,5076	479275	0,6553	0,3469
34	0,1429	0,4806	0,4740	473498	0,6566	0,3533
35	0,1430	0,4806	0,4774	479666	0,6526	0,3419
36	0,1407	0,4806	0,9285	456641	0,6635	0,3734
37	0,1441	0,4806	0,4942	481606	0,6518	0,3379
38	0,1429	0,4806	0,5002	482767	0,6553	0,3432
moyennes	0,1430	0,4806	0,5028	468866	0,6552	0,3424

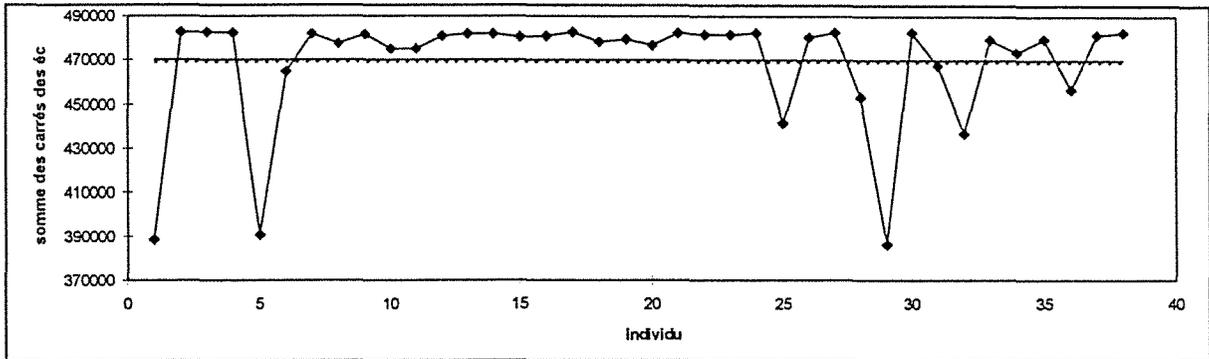


Figure V.8.1 : Variation du carré des écarts après suppression d'un individu sur l'échantillon de MESmax

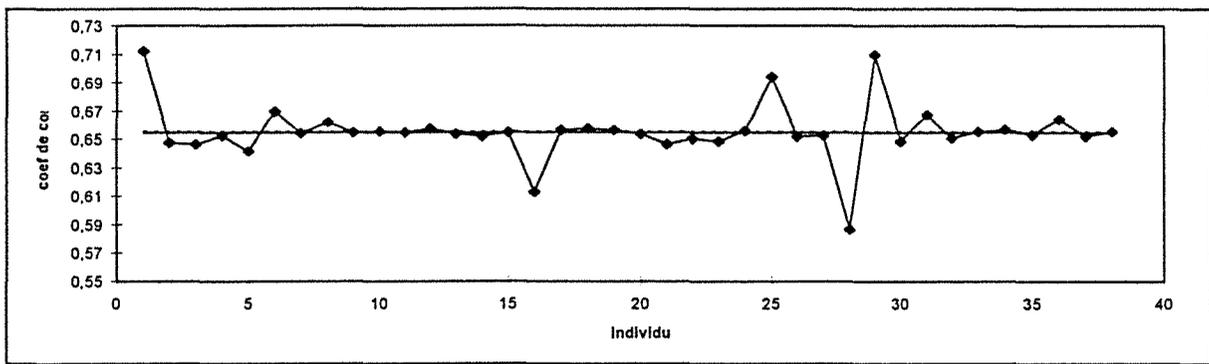


Figure V.8.2 : Variation du coefficient de corrélation après suppression d'un individu sur l'échantillon de MESmax

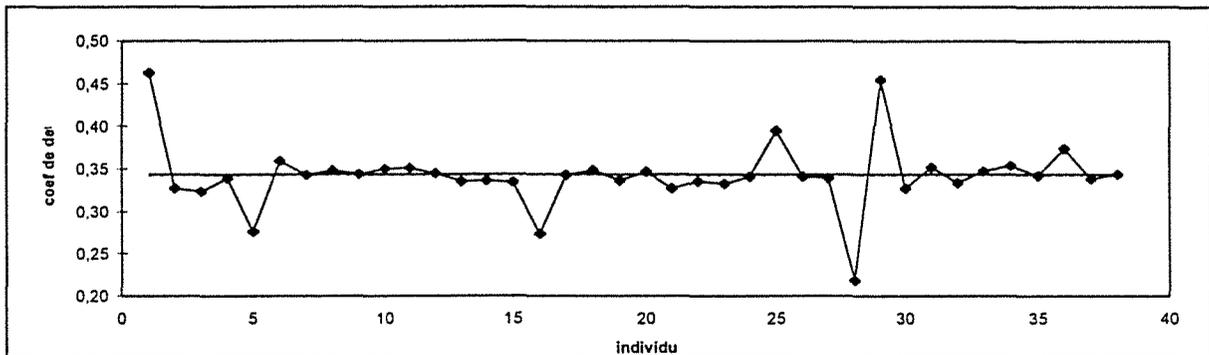


Figure V.8.3 : Variation du coefficient de détermination après suppression d'un individu sur l'échantillon de MESmax

ANNEXE V.9 - Description du générateur de pollution

La construction de ce "générateur" de pollution a été réalisée pour fonctionner sur le tableur de Windows : EXCEL 5.0. Il utilise plusieurs commandes propres à ce tableur, ainsi que certaines commandes issues du programme HYDROLAB de J-P Labordes, ou encore son programme de calcul de régressions.

Le tableau suivant indique la structure en colonne du tableau ayant permis la génération des variables de pluviométries. Il s'agit de simuler un événement pluvieux, c'est à dire de "générer" les variables nécessaires à la détermination de la pollution. La première colonne indique le nombre de colonnes utilisées. La deuxième colonne précise l'élément calculé alors que la troisième indique les formules et équations utilisées.

Afin de tenir compte des variations saisonnières deux tableaux de ce type ont été utilisés, l'un utilisant les équations établies pour l'été, l'autre celles pour l'hiver. C'est ainsi, que 50 années de mesures ont été "générées", soit 4830 événements, en considérant 2488 événements d'été et 2342 événements d'hiver.

La pluviométrie déterminée, il suffit alors d'utiliser les équations des modèles globaux et des régressions déterminées au Chapitre V pour obtenir les valeurs correspondant aux variables MESTot, MESmax/h, MESmoy et MESmax.

colonnes	éléments générés	Formules utilisées
1	G(TS)	=ALEA() \Rightarrow valeur $\in [0, 1[$
2	TS	$= x_0 + g * \left(\ln \left(\frac{1}{1 - G(TS)} \right)^{1/p} \right)$
3	G(P5)	=ALEA() \Rightarrow valeur $\in [0, 1[$
4	P5	$= x_0 + g * \left(\ln \left(\frac{1}{1 - G(TS)} \right)^{1/p} \right)$
5	G(Durée évt)	=ALEA() \Rightarrow valeur $\in [0, 1[$
6	Durée évt	$= x_0 + g * \left(\ln \left(\frac{1}{1 - G(TS)} \right)^{1/p} \right)$
7	Htot	$= a_1 P5 + b_1 \text{Durée évt} + c_1 + \sigma_{\text{Htot}} * (1 - r_1^2)^{0,5} * U\text{-gauss}(ALEA())$
8	[lmoy]	$= (\text{si}(\text{Htot} \leq 0; 1; \text{Htot}) / \text{Durée évt})$
9	lmoy	$= \text{si}([\text{lmoy}] > P5; P5; [\text{lmoy}])$
10	[P20]	$= a_2 P5 + \sigma_{P20} * (1 - r_2^2)^{0,5} * U\text{-gauss}(ALEA())$
11	P20	$= \text{si}([P20] > P5; P5; \text{si}([P20] < \text{lmoy}; \text{lmoy}; [P20]))$
12	[P60]	$= a_3 P20 + \sigma_{P60} * (1 - r_3^2)^{0,5} * U\text{-gauss}(ALEA())$
13	P60	$= \text{si}([P60] > P20; P20; \text{si}([P60] < \text{lmoy}; \text{lmoy}; [P60]))$

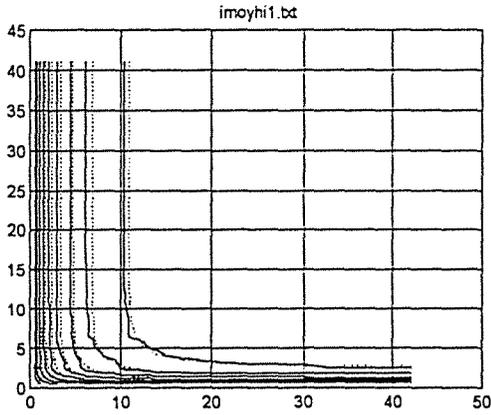
ANNEXE V.10 - Courbes de fréquences des divers couples Temps Sec/Pluie

Les courbes de fréquences sont croissantes de 0 à 1, avec un incrément de 0,1, dans le sens ↗.

_____ courbe réelle - - - - - courbe théorique

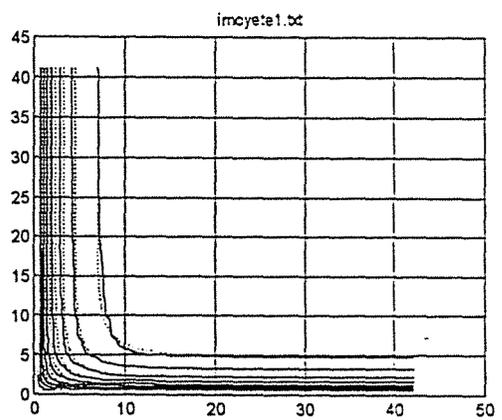
TS/lmoy Hiver

lmoy



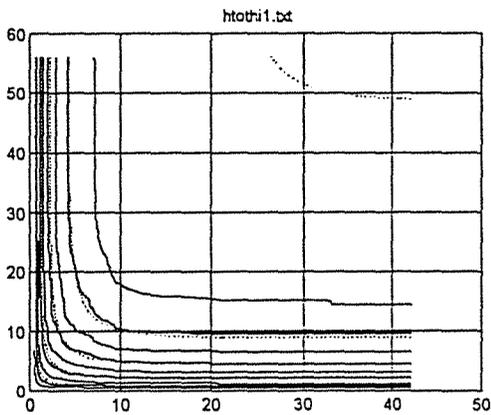
TS/lmoy été

lmoy



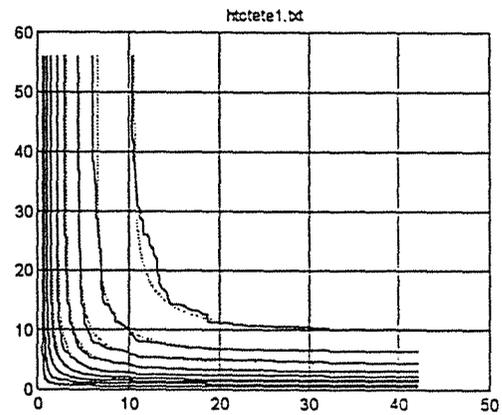
TS/Htot Hiver

Htot



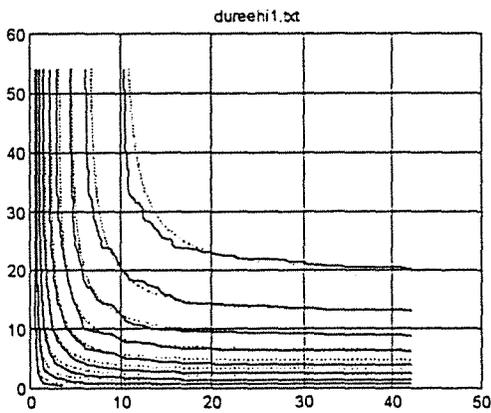
TS/Htot été

Htot



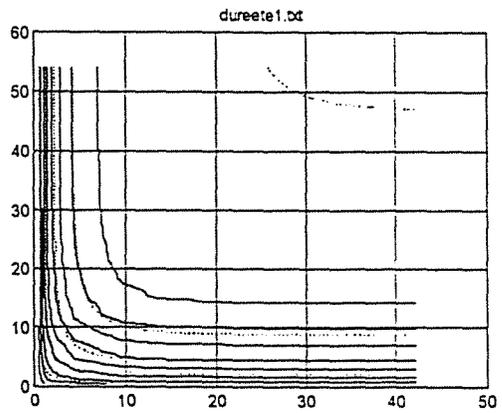
TS/Durée évt Hiver

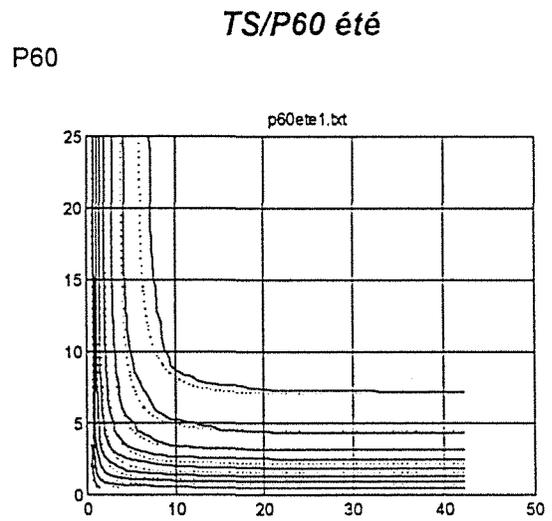
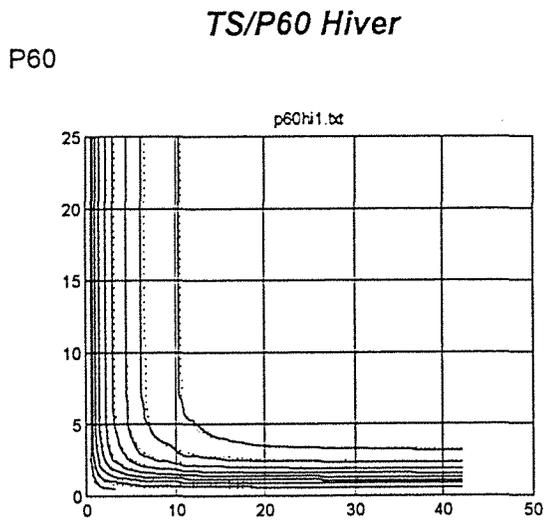
Durée évt



TS/Durée évt été

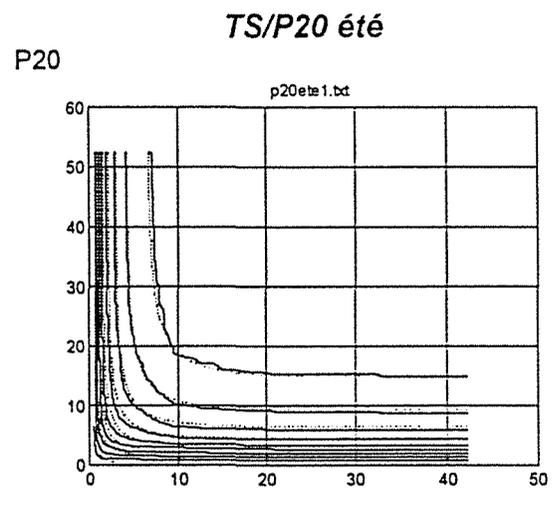
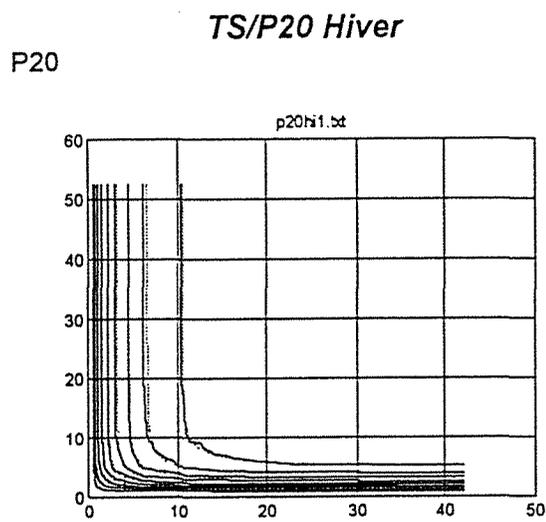
Durée évt





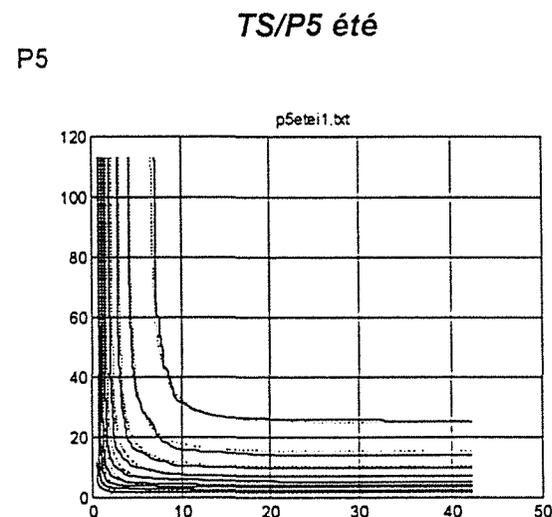
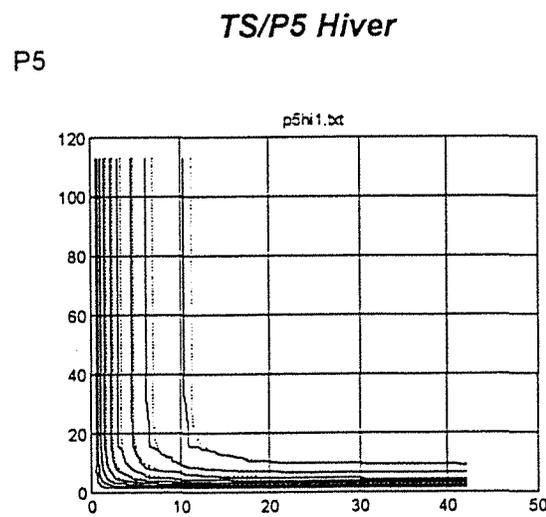
TS

TS



TS

TS



TS

TS

ANNEXE V.11 - Tableau de calcul des périodes de retour des 38 événements de pollution

Dans le tableau qui suit on pourra comparer les périodes de retour T des variables de pluviométrie et des variables de pollution. Pour ces dernières les trois modes de détermination sont comparés à la période de retour obtenue par le générateur pour les valeurs observées.

	N° évt	Date	H tot	T(Htot) année	I moy	T(I moy) année	Durée évt	T(Durée) année	TS	T(TS) année	MES tot obs	MES tot calc	T1 obs	T1 calc	T2 calc	T3 calc	MES max	MES max calc	T1 obs	T1 calc	T2 calc	T3 calc	MES moy	MES moy calc	T1 obs	T1 calc	T2 calc	T3 calc
1	22,1	03/05/87	7,5	0,08	0,8	0,03	0,378	0,02	12,26	0,85	383	490	4,8	5,1	4,5	3,9	1715	4096	11,6	63,2	13,3	11,0	542	1812	8,6	62,4	13,5	11,9
2	22,2	03/05/87	12	0,15	1,3	0,04	0,396	0,02	0,374	0,02	133	147	4,2	4,2	3,6	4,0	297	234	4,5	4,3	3,7	4,0	115	106	4,4	4,4	3,7	4,2
3	23,2	04/05/87	18	0,32	1,6	0,05	0,45	0,02	0,302	0,02	183	161	4,3	4,3	3,5	4,1	227	202	4,3	4,2	3,4	3,4	107	92	4,4	4,3	3,4	3,5
4	28,1	15/05/87	2	0,03	0,5	0,03	0,168	0,02	1,941	0,04	80	110	4,1	4,1	3,9	3,8	658	609	5,7	5,5	4,6	4,4	503	238	8,1	5,4	4,6	4,5
5	33,1	29/05/87	3,6	0,04	0,5	0,03	0,322	0,02	6,911	0,21	410	320	4,9	4,7	4,4	3,9	3732	2363	48,6	18,3	7,2	6,3	1520	972	39,5	16,8	7,4	6,6
6	33,2	31/05/87	11	0,13	0,5	0,03	0,922	0,03	1,67	0,04	989	375	6,2	4,8	4,5	4,1	1664	918	11,2	6,7	6,4	7,1	533	415	8,5	7,1	6,6	7,7
7	34,1	01/06/87	1,6	0,03	1,3	0,04	0,053	0,02	3,308	0,07	107	96	4,1	4,1	3,8	3,8	858	837	6,5	6,4	4,8	4,4	858	321	14,0	6,1	4,8	4,5
8	34,2	03/06/87	21	0,49	0,8	0,03	1,068	0,03	0,36	0,02	648	365	5,4	4,8	3,7	4,4	814	291	6,3	4,5	3,7	4,0	252	133	5,5	4,6	3,7	4,2
9	35,1	05/06/87	5,5	0,06	1,2	0,04	0,184	0,02	1,935	0,04	148	141	4,2	4,2	3,9	3,9	958	907	6,9	6,7	5,8	5,9	335	390	6,2	6,8	5,9	6,3
10	36,1	11/06/87	3	0,04	1,1	1,74	0,011	0,02	3,154	0,07	294	109	4,6	4,1	3,6	3,8	1452	1138	9,7	7,8	5,6	5,3	1331	459	29,4	7,5	5,7	5,5
11	36,2	12/06/87	6	0,06	4,4	0,17	0,057	0,02	0,559	0,02	377	44	4,8	4,0	3,6	3,8	774	281	6,1	4,4	4,0	4,3	500	122	8,1	4,5	4,1	4,5
12	59,1	26/09/87	15	0,23	1	0,04	0,648	0,02	1,817	0,04	265	292	4,5	4,6	4,4	4,1	1140	964	7,8	6,9	7,2	8,2	217	441	5,2	7,3	7,3	9,0
13	67,1	16/10/87	6,3	0,11	0,7	0,05	0,401	0,02	1,568	0,03	145	199	4,2	4,4	4,0	3,9	510	787	5,1	6,2	5,4	5,9	207	343	5,1	6,3	5,5	6,3
14	79,1	22/11/87	8	0,15	0,3	0,04	1,045	0,03	1,09	0,03	320	390	4,7	4,8	4,2	4,1	540	645	5,2	5,6	4,9	5,5	336	288	6,2	5,8	5,0	5,9
15	80,1	25/11/87	3	0,05	0,5	0,04	0,258	0,02	2,176	0,04	78	160	4,1	4,3	3,9	3,8	422	839	4,8	6,4	5,2	5,2	225	339	5,3	6,3	5,2	5,5
16	93,1	11/02/88	3,6	0,06	0,7	0,05	0,229	0,02	9,793	0,17	473	350	5,0	4,7	4,1	3,8	2700	3005	23,2	28,8	8,6	7,6	1212	1235	24,4	25,3	8,7	8,0
17	95,1	12/03/88	2	0,04	0,6	0,05	0,136	0,02	5,187	0,08	146	176	4,2	4,3	3,9	3,8	1080	1413	7,5	9,4	5,7	5,3	660	550	10,3	8,7	5,8	5,5
18	105,1	12/03/88	10	0,22	0,6	0,05	0,655	0,02	3,655	0,06	293	365	4,6	4,8	4,4	4,0	1122	1743	7,7	11,8	8,7	9,6	209	787	5,1	12,6	8,9	10,7
19	107,1	16/03/88	6,9	0,12	1,3	0,10	0,215	0,02	1,893	0,04	108	152	4,1	4,3	3,8	3,9	430	925	4,9	6,8	5,9	6,4	173	406	4,9	7,0	6,0	6,9
20	107,2	16/03/88	3,7	0,06	0,7	0,06	0,216	0,02	0,375	0,02	107	86	4,1	4,1	3,6	3,8	658	184	5,7	4,2	3,6	3,8	246	77	5,4	4,2	3,6	3,9
21	107,3	17/03/88	2,7	0,05	0,5	0,05	0,214	0,02	0,332	0,02	52	82	4,0	4,1	3,5	3,8	298	148	4,5	4,1	3,5	3,6	163	60	4,8	4,1	3,5	3,7
22	108,1	25/03/88	3,8	0,06	1	0,07	0,154	0,02	0,759	0,03	114	81	4,2	4,1	3,7	3,8	502	344	5,1	4,6	4,2	4,4	246	143	5,4	4,6	4,2	4,6
23	108,2	25/03/88	4,7	0,08	0,8	0,06	0,238	0,02	0,391	0,02	66	95	4,0	4,1	3,6	3,9	412	207	4,8	4,2	3,7	3,9	113	88	4,4	4,3	3,7	4,0
24	109,1	31/03/88	3,2	0,05	0,4	0,04	0,376	0,02	2,653	0,04	111	215	4,1	4,4	4,1	3,9	744	1038	6,0	7,3	5,5	5,5	264	423	5,6	7,1	5,6	5,8
25	112,1	03/05/88	7,2	0,08	2,8	0,09	0,107	0,02	5,488	0,14	104	243	4,1	4,5	3,9	3,8	688	2309	5,8	17,6	10,1	9,2	388	1018	6,8	18,0	10,3	9,9
26	114,1	07/06/88	2,6	0,04	1,6	0,05	0,069	0,02	1,175	0,03	120	62	4,2	4,0	3,7	3,8	660	434	5,7	4,9	4,4	4,4	412	173	7,0	4,9	4,4	4,5
27	114,2	12/06/88	4,3	0,05	2,1	0,06	0,085	0,02	4,422	0,10	213	187	4,4	4,3	3,9	3,8	1455	1745	9,7	11,8	7,1	6,5	800	731	12,8	11,5	7,2	6,8
28	121,1	29/06/88	3,6	0,04	5	0,21	0,03	0,02	10,33	0,53	390	295	4,8	4,6	3,7	3,8	3440	3092	39,4	30,7	7,7	6,5	1413	1270	33,4	26,7	7,8	6,8
29	121,2	30/06/88	2,4	0,03	2,6	0,08	0,039	0,02	0,56	0,02	202	31	4,4	3,9	3,5	3,8	2060	204	14,8	4,2	3,8	3,9	761	81	12,1	4,2	3,8	4,0
30	121,3	01/07/88	9,7	0,11	4,7	0,19	0,087	0,02	0,821	0,03	85	66	4,1	4,0	3,7	3,8	307	429	4,5	4,9	4,7	5,2	201	193	5,1	5,0	4,8	5,6
31	122,1	14/07/88	5,6	0,06	0,8	0,03	0,309	0,02	3	0,06	118	222	4,2	4,4	4,2	3,9	402	1357	4,8	9,1	6,9	6,7	242	505	5,4	9,2	7,1	7,2
32	123,1	24/07/88	2,2	0,03	0,7	0,03	0,123	0,02	6,780	0,21	268	211	4,5	4,4	4,0	3,8	2770	1837	24,4	12,6	5,8	5,1	1541	720	40,8	11,3	5,9	5,3
33	123,2	26/07/88	4,9	0,05	1,9	0,06	0,105	0,02	2,243	0,05	355	125	4,7	4,2	3,8	3,8	1180	1003	8,0	7,1	6,0	5,9	772	426	12,3	7,2	6,1	6,2
34	123,3	27/07/88	6,9	0,07	1,8	0,06	0,156	0,02	0,485	0,02	415	73	4,9	4,0	3,6	3,9	820	260	6,3	4,4	3,9	4,2	618	114	9,7	4,4	4,0	4,4
35	130,1	07/10/88	6,9	0,12	1,3	0,09	0,226	0,02	0,625	0,02	124	102	4,2	4,1	3,7	3,9	646	335	5,6	4,6	4,2	4,6	258	148	5,5	4,7	4,2	4,8
36	130,2	11/10/88	22	1,61	0,7	0,06	1,246	0,03	3,166	0,05	444	540	4,9	5,2	4,7	4,4	644	1613	5,6	10,8	9,0	10,6	196	739	5,0	11,7	9,1	11,9
37	132,1	19/10/88	3	0,05	0,5	0,04	0,266	0,02	6,752	0,10	311	284	4,6	4,6	4,1	3,8	1573	2152	10,5	15,7	7,1	6,5	890	869	14,8	14,3	7,2	6,8
38	133,1	20/10/88	6,6	0,11	1,3	0,09	0,217	0,02	0,71	0,03	319	103	4,7	4,1	3,7	3,9	760	374	6,0	4,7	4,3	4,7	341	164	6,3	4,8	4,3	5,0

Service Commun de la Documentation
INPL
Nancy-Brabois

**AUTORISATION DE SOUTENANCE DE THESE
DU DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE
DE LORRAINE**

o o o

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :

**Monsieur LABORDE Jean-Pierre, Professeur, Université de Nice Sophia Antipolis,
Monsieur OBERLIN Guy, Directeur de Recherche ORSTOM, CEMAGREF Lyon.**

Le Président de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, autorise :

Mademoiselle STIEBER Pascale

NANCY BRABOIS
2, AVENUE DE LA
FORET-DE-HAY
BOITE POSTALE
F - 5 4 5 0
VANDŒUVRE CÉDEX

à soutenir devant l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE,
une thèse intitulée :

**"Approche d'une caractérisation simple de la pollution, en hydrologie
urbaine, à partir du couple "temps sec/pluie"."**

en vue de l'obtention du titre de :

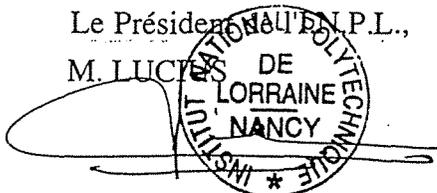
**DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE
LORRAINE**

Spécialité : **"GENIE CIVIL & MINIER"**

Fait à Vandoeuvre le, **9 Octobre 1996**

Le Président de l'IN.P.L.,

M. LUCY



RESUME

Le souci constant de diminuer l'impact des rejets urbains par temps de pluie a conduit les aménageurs à s'intéresser à la composition et à la variation de la pollution induite par les eaux de ruissellement sur des bassins versants urbanisés. Plusieurs études ont montré que la pollution, souvent évaluée par la mesure de la quantité de matières en suspension, est une fonction croissante de plusieurs facteurs climatologiques, dont les principaux sont la pluie et la durée du temps sec précédent l'épisode pluvieux.

Afin de mieux évaluer la relation qui existe entre la pollution et le couple de variables, constitué de la durée du temps sec précédent un épisode pluvieux et des variables représentatives de la pluie suivante, une étude statistique a été entreprise sur le bassin versant urbanisé de la commune d'Entzheim.

Une **première étape** porte sur l'étude du comportement de variables aléatoires représentatives de la pluie d'une part, et de la durée de temps sec d'autre part, ces deux séries ayant été issues de données recueillies sur 10,25 années. Les ajustements ont été testés au moyen des lois utilisées classiquement en hydrologie.

Une **seconde étape** de cette étude a conduit à un traitement de données de pollution sur un échantillon de 38 individus. L'analyse statistique a permis de définir les paramètres du couple temps sec/pluie les plus influents dans la production de pollution et d'établir des régressions linéaires. L'ajustement de modèles globaux sur les données de pollution, comparé à ces dernières, offre des modèles susceptibles d'être transposés à d'autres bassins et pour lesquels il est possible de déterminer une période de retour pour chaque événement tout en ne connaissant que peu de paramètres.

La **troisième étape** a conduit à constituer les lois de fréquence des couples temps sec/pluie et à les comparer à celles obtenues pour la pollution lors de la seconde étape. L'objectif est de définir une loi simple entre les fréquences, de façon à encadrer rapidement la période de retour d'un événement de pollution.

ABSTRACT

The constant concern for reduction of impact of urban discharges during rainy periods has lead to investigate the pollution induced by water running on the surface of urbanised catchments basins. Many studies have shown that pollution is an increasing function of many hydrologic factors, the principal ones beeing rain and the laps of dry periods preceding a rainy episode.

To better evaluate the natural link existing between pollution and twin variables: *laps of dry periods*, and *intensity of subsequent rain*, a statistical study has been conducted in the urbanised catchment of Entzheim (France).

A first step consisted in the separate study of the behaviours of each random variable: rain and dry period, using the Gauss, Galton, Gumbel, Fuller and Weibull laws. Fitting has been made using data sampled over 10 years period.

The second step of this research has consisted of processing pollution data based on 38 event sample. The statistical analysis has permitted to define the parameter of the twin variables: laps of dry periods / representative variable of subsequent rain the most influencing in the production of pollution and to establish linear regressions. Fitting of global model on pollution data compared at the regression give same model that can be transposed on other catchment. It is now possible to determine the occurrence of each event knowing only a few parameter.

The third step consisted on the constitution of law of frequence of the twin variables: *laps of dry periods / representative variable of subsequent rain* and to compare it to the law obtain in the second step. The objectif is to give obviously a simple law in order to estimate trends for occurrence probability of pollution event.