



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-01776381>

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

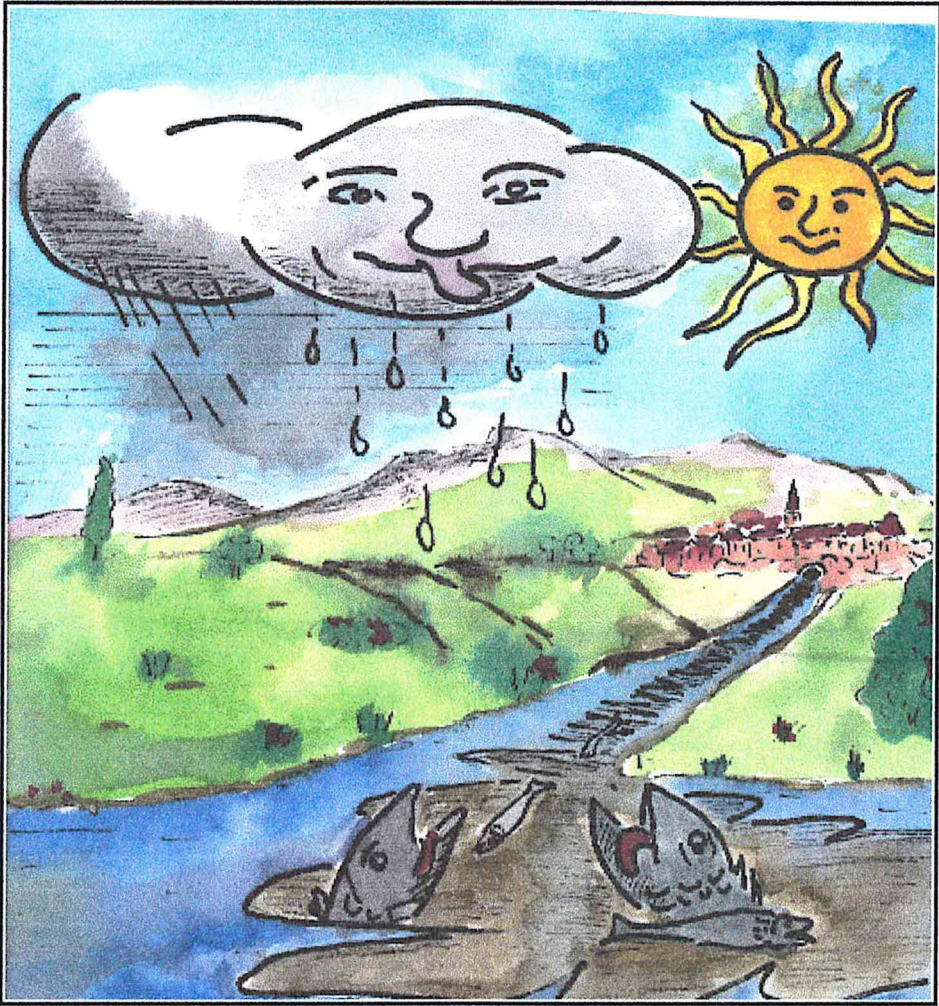
Directeur des Études à l'ENGEES
Correspondant du DEA PAE3S à l'ENGEES
ENGEES
1 Quai Koch - BP 1039 F
67070 STRASBOURG CEDEX
(spécialité : Traitement de données)

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 "jackknife" | 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.

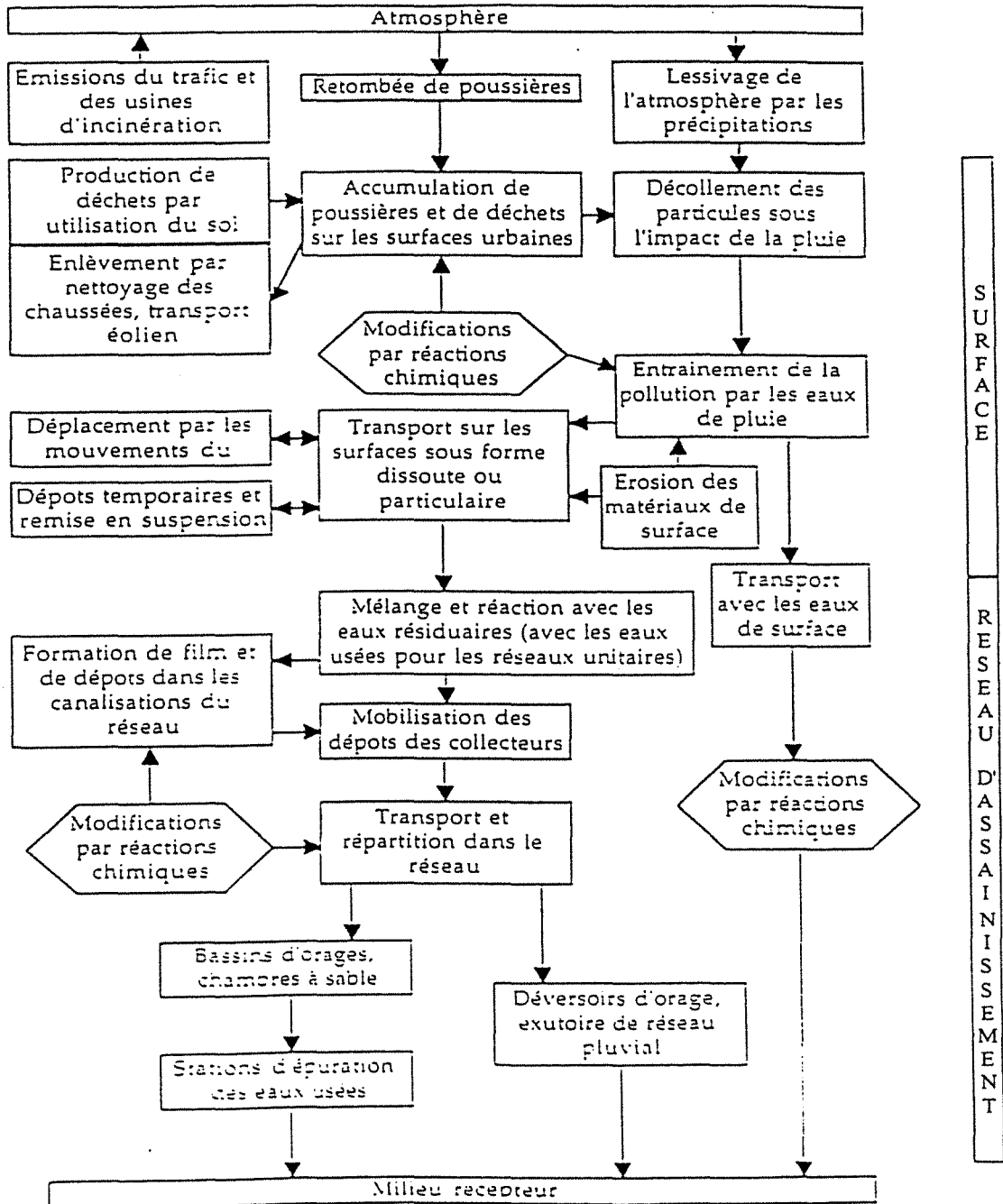


Figure I.1 : Circulation de la pollution en milieu urbain d'après Geiger (in Marquet, 1993).

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.

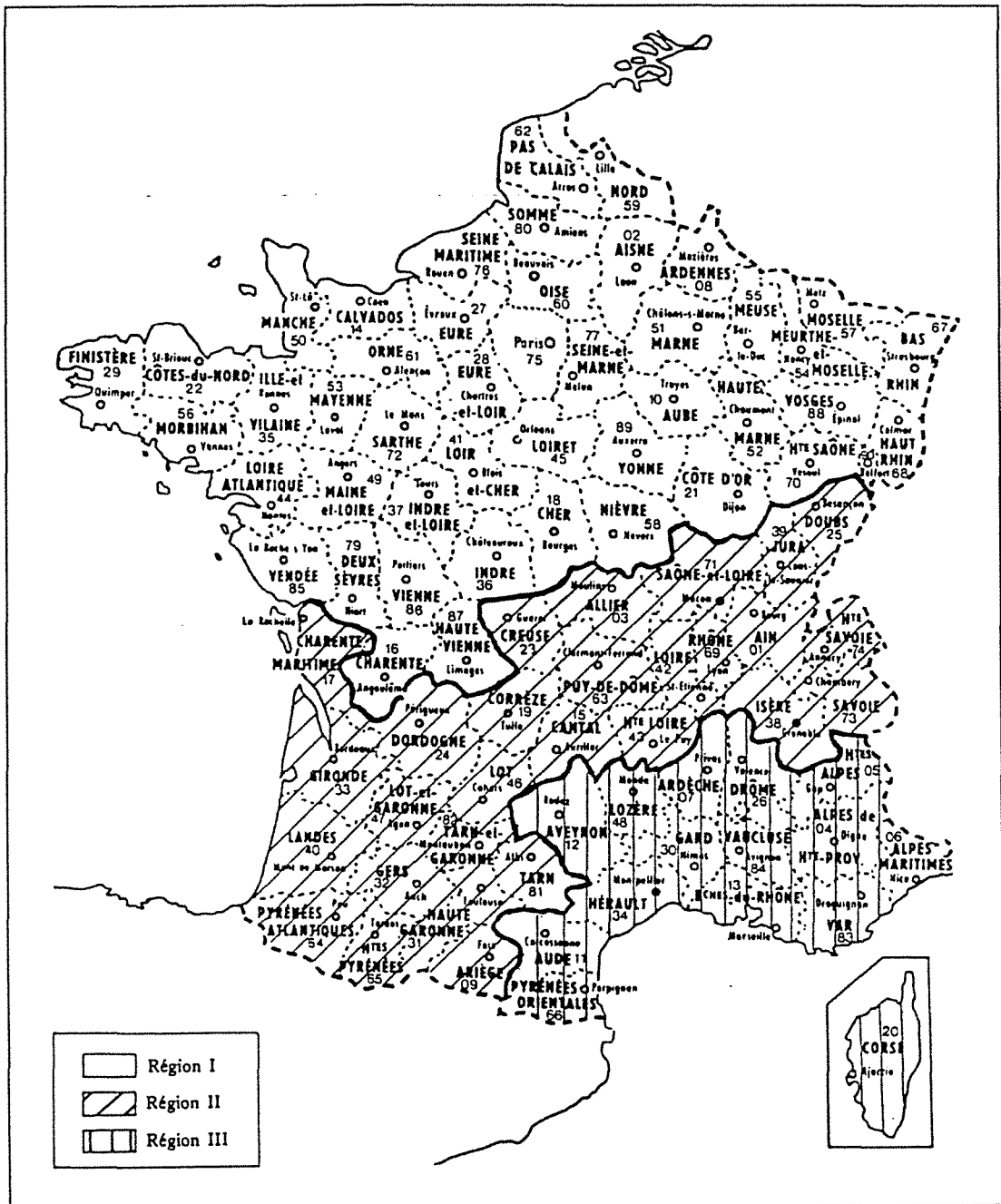


Figure 1.2 : Détermination des régions de pluviométrie homogène, annexe II de la circulaire interministérielle de 1977.

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).

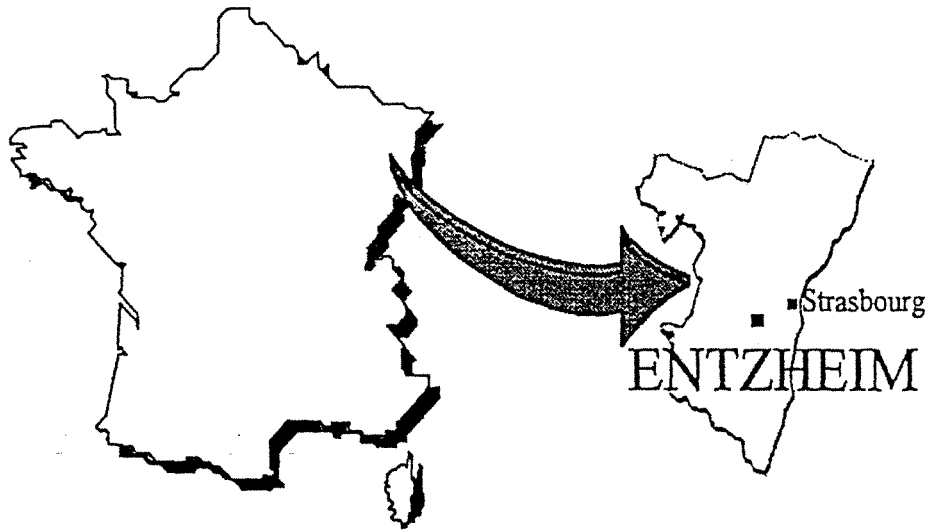


Figure II.1 : Localisation de la commune d'Entzheim.

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.

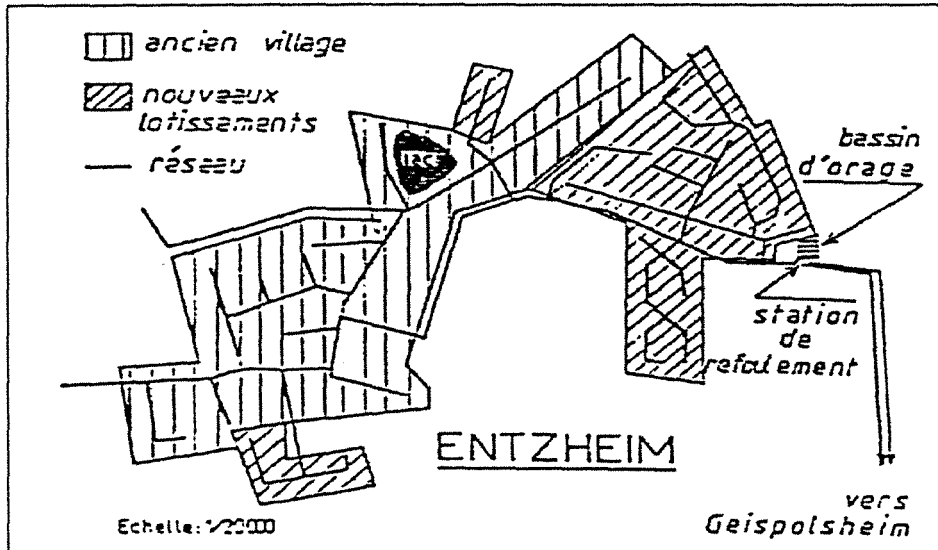


Figure II.2 : Schématisation du village et du réseau d'assainissement d'Entzheim d'après Arières (1985).

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.

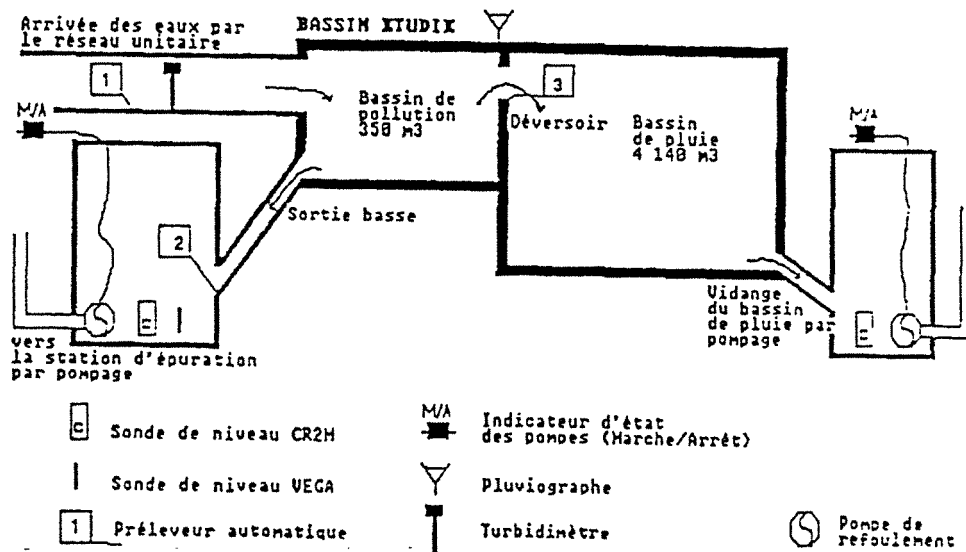


Figure II.3: Equipement du bassin d'orage d'Entzheim

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.

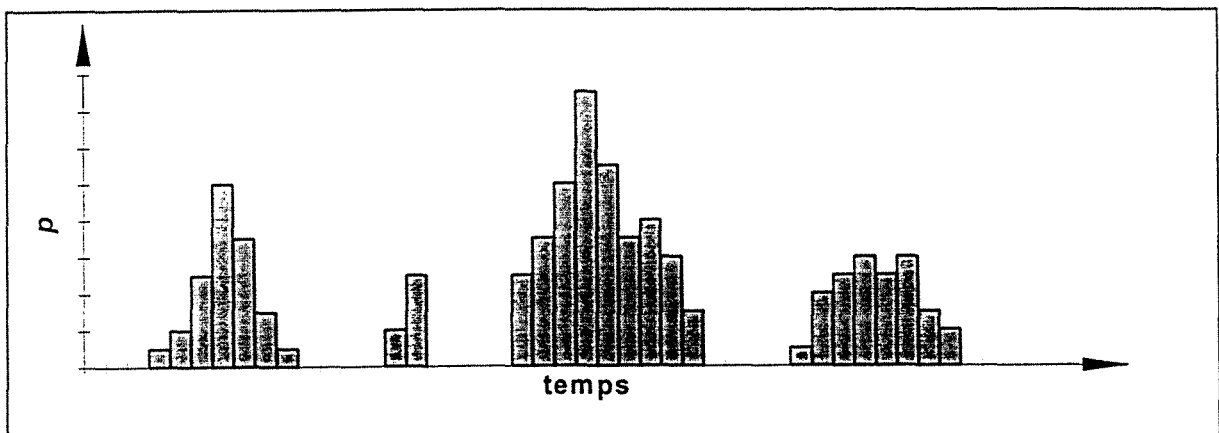


Figure II.4 : Distribution de la pluie au cours du temps.

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.

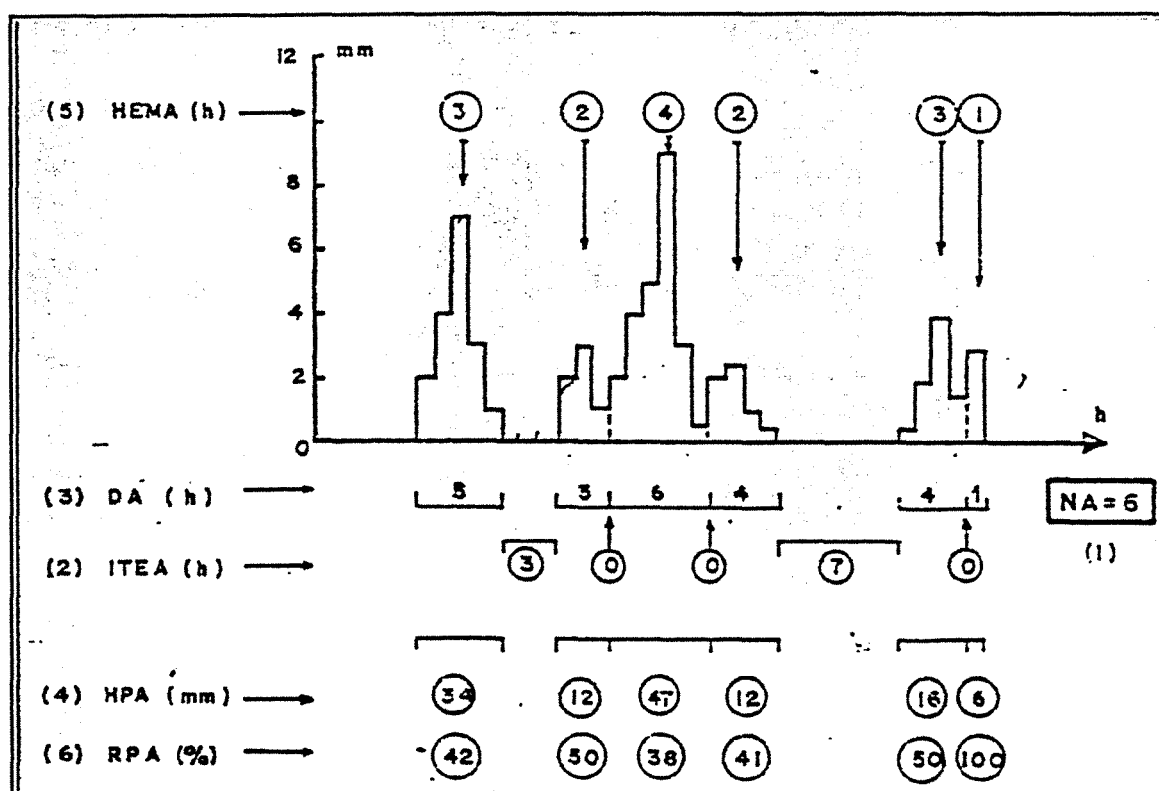


Figure II.5 : Description d'un événement pluvieux d'après Tourasse (1981).

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 hyétoGRAMME,
- ⇒ 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.

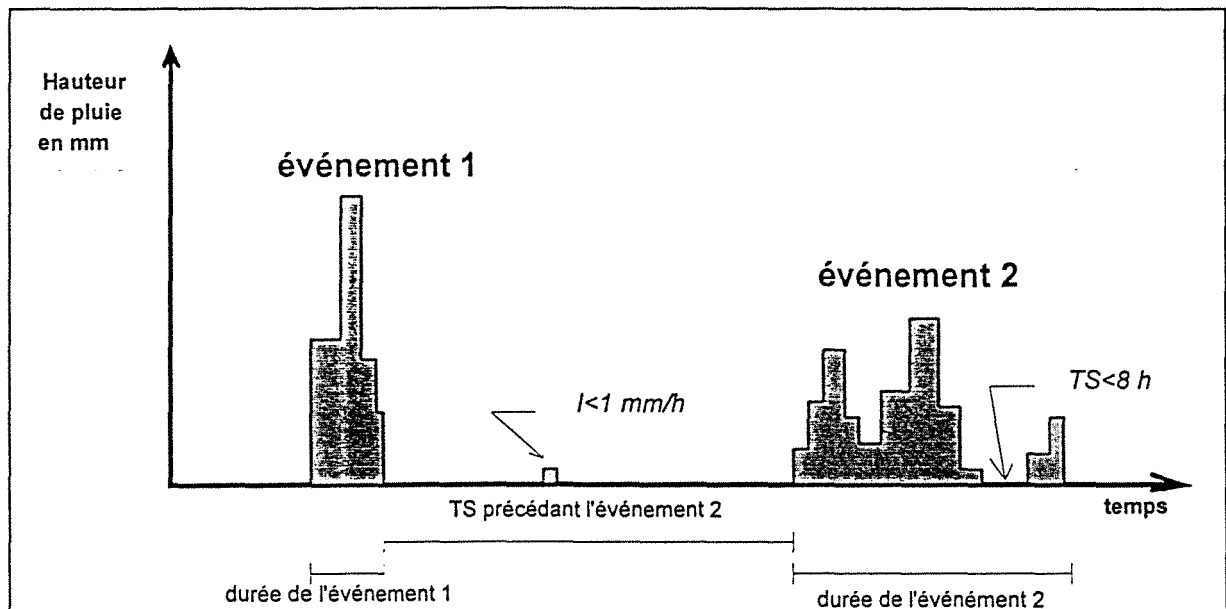


Figure II.6 : Description du découpage en événements de la chronique de pluviométrie de pluie et de temps sec retenu.

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.

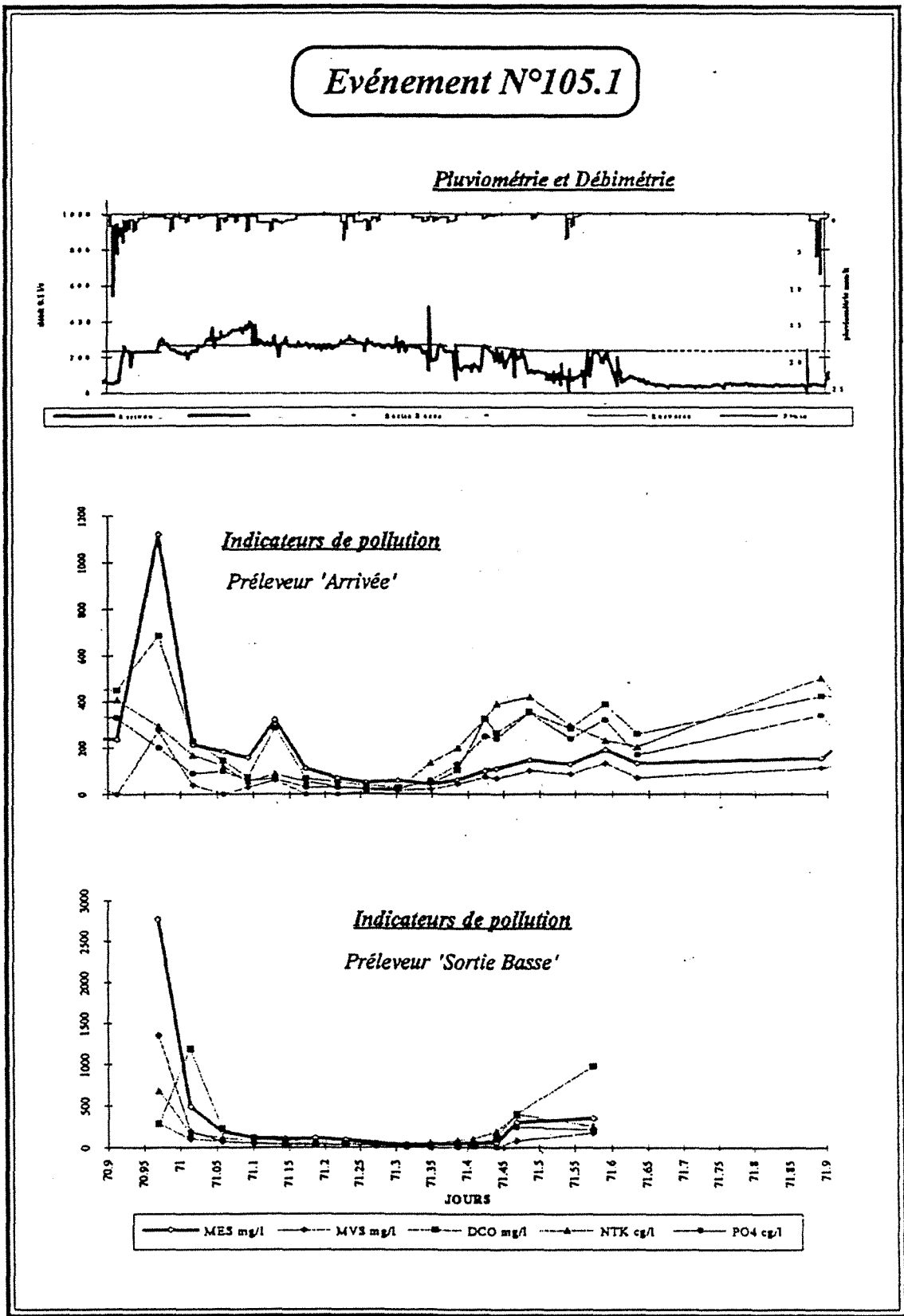


Figure II.8 : Exemple de graphiques de visualisation des enregistrements pour l'événement 105.1.

| | 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 | 77 | 77 | 618 |
| 34 | 123,3 | 27/07/88 | 6,9 | 1,8418 | 2,6165 | 3,6651 | 8,1714 | 0,1561 | 0,4845 | 646 | 82 | 124 | 258 |
| 35 | 130,1 | 07/10/88 | 6,9 | 1,2699 | 5,0687 | 7,8793 | 14,7605 | 0,2264 | 0,6250 | 644 | 88 | 444 | 196 |
| 36 | 130,2 | 11/10/88 | 22,3 | 0,7458 | 2,0003 | 3,6890 | 5,3932 | 1,2458 | 3,1664 | 1573 | 207 | 311 | 890 |
| 37 | 132,1 | 19/10/88 | 3,0 | 0,4706 | 2,0408 | 3,2489 | 4,0646 | 0,2656 | 6,7518 | 760 | 78 | 341 | 341 |
| 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.

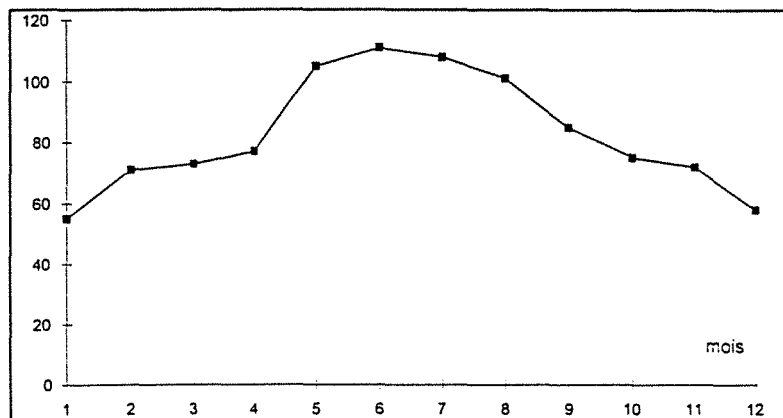


Figure III.1 : Variation annuelle du nombre d'événements sur 10,25 années d'observations.

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.

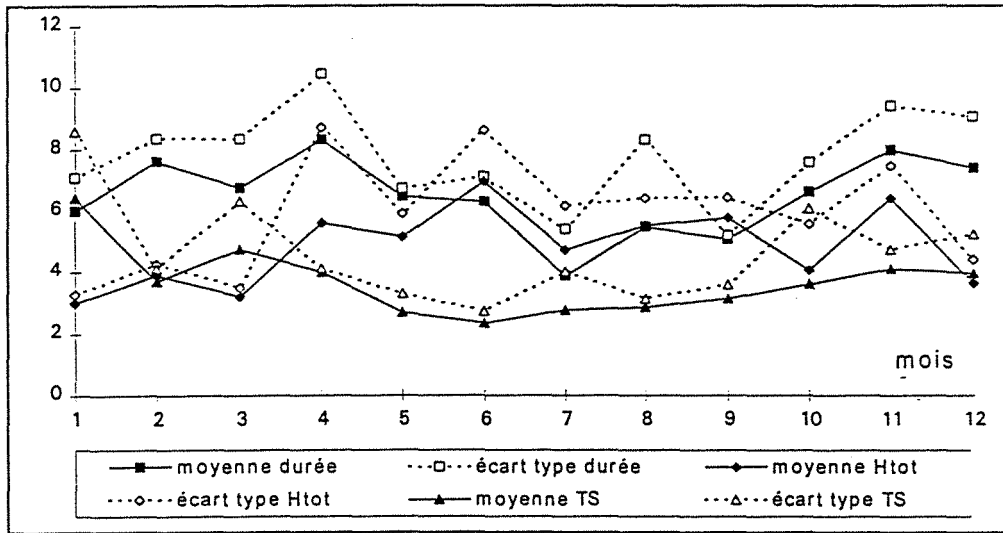


Figure III.2 : Variation annuelle des variables : Durée de l'événement, Hauteur totale, et Temps sec Précédent, représentées par les moyennes et les écarts-types.

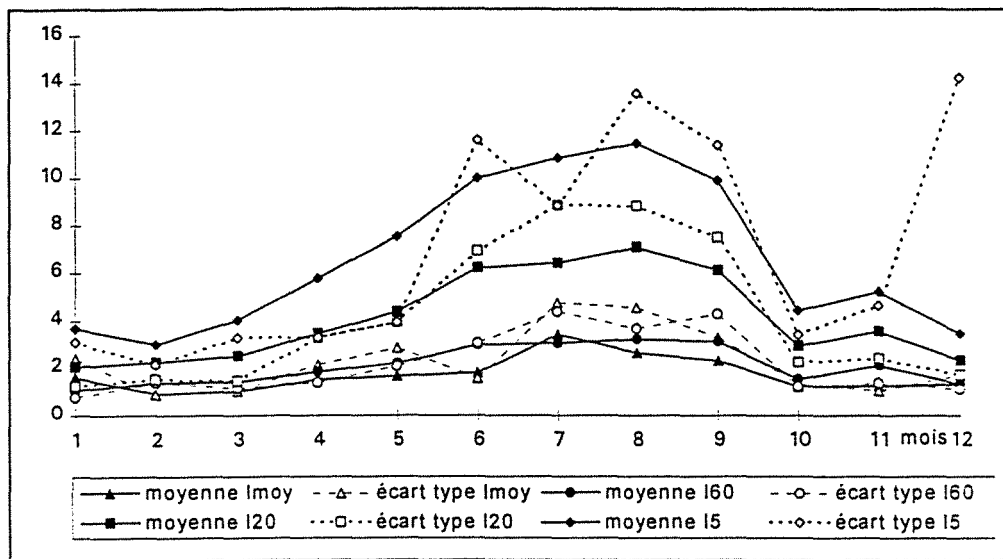


Figure III.3 : Variation annuelle des variables Intensité moyenne, intensité moyenne maximale sur 60, 20 et 5 min représentée par les moyennes et les écarts-types.

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.

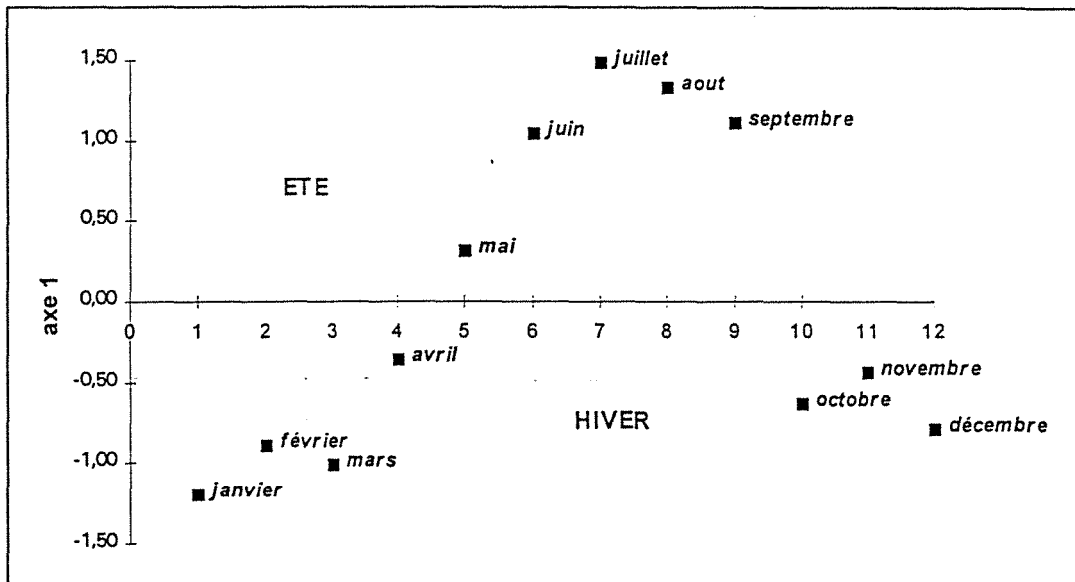


Figure III.4 : Résultat de l'A.C.P. sur les moyennes et écarts-types des variables de pluie, représentation des individus "mois".

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 :

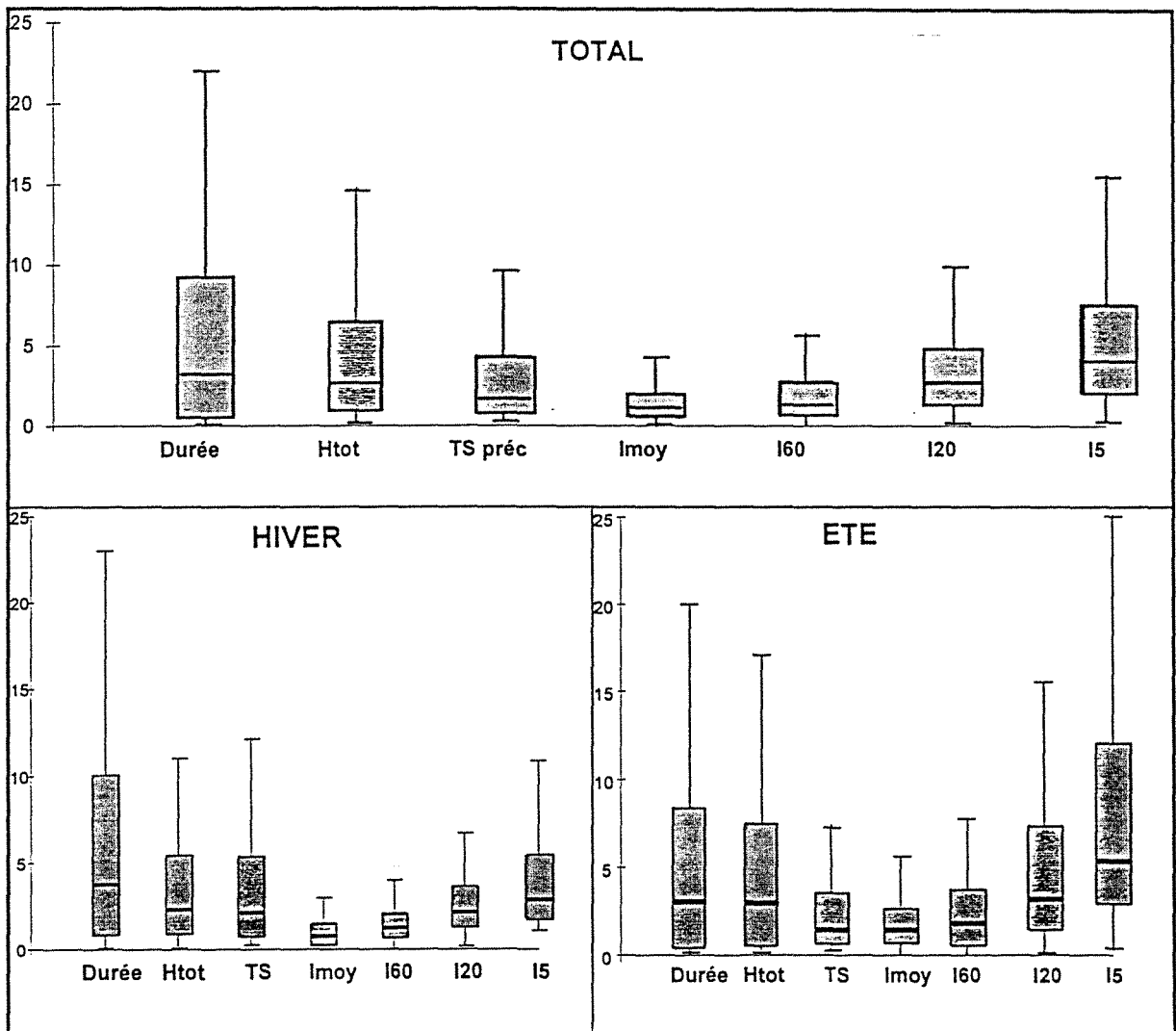
- les valeurs minimales et maximales des séries,
- la moyenne, la variance et l'écart-type,
- les quartiles Q1, Q2 et Q3 et les valeurs adjacentes correspondantes.

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.

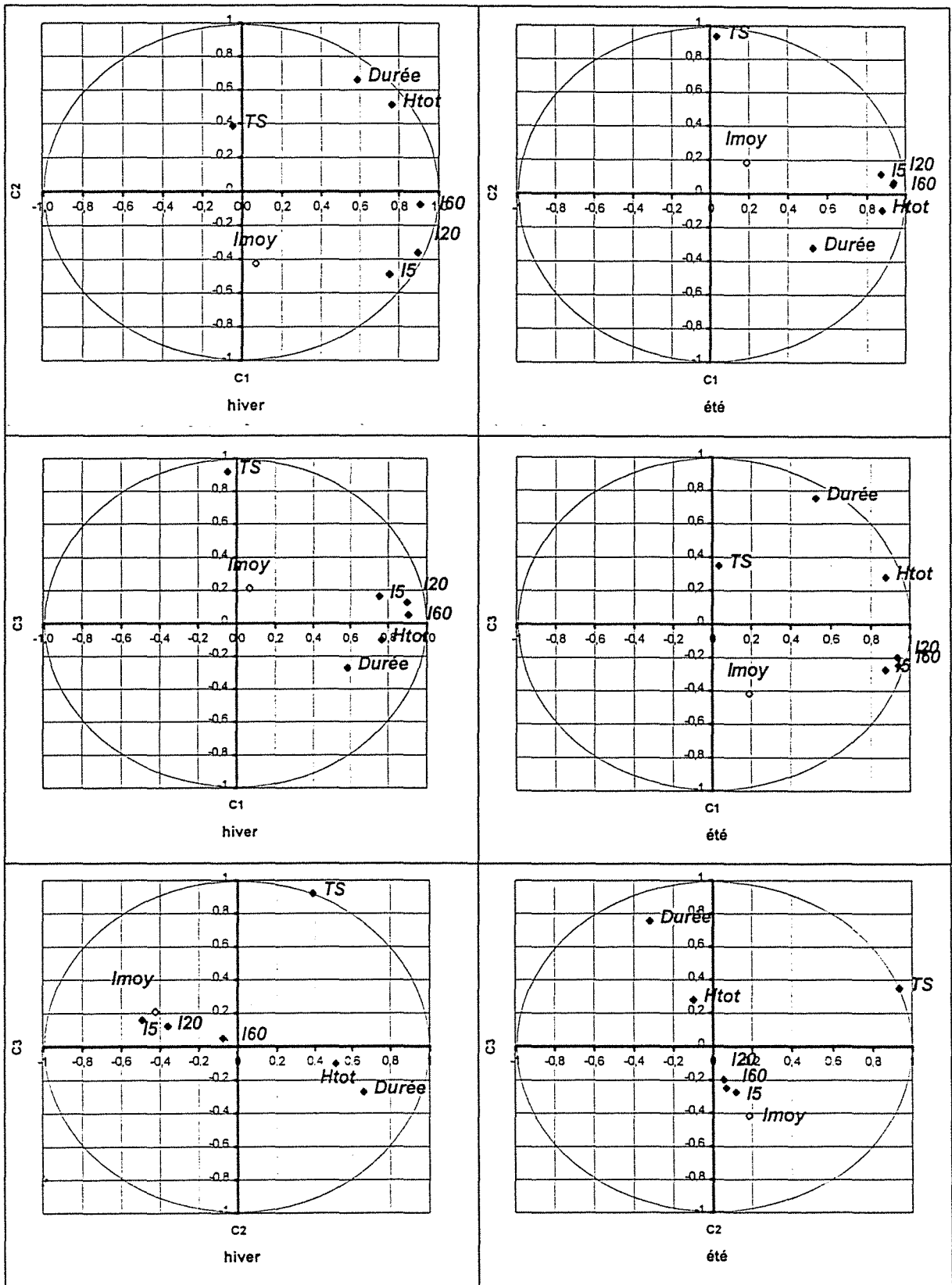
| | | E T E | | | | | | |
|-----------------------|--------------------|-----------|--------|---------|--------|--------------------|--------------------|-------------------|
| | | Durée évt | Htot | TS préc | Imoy | Imoymax sur 60 min | Imoymax sur 20 min | Imoymax sur 5 min |
| H I V E R | Durée évt | 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

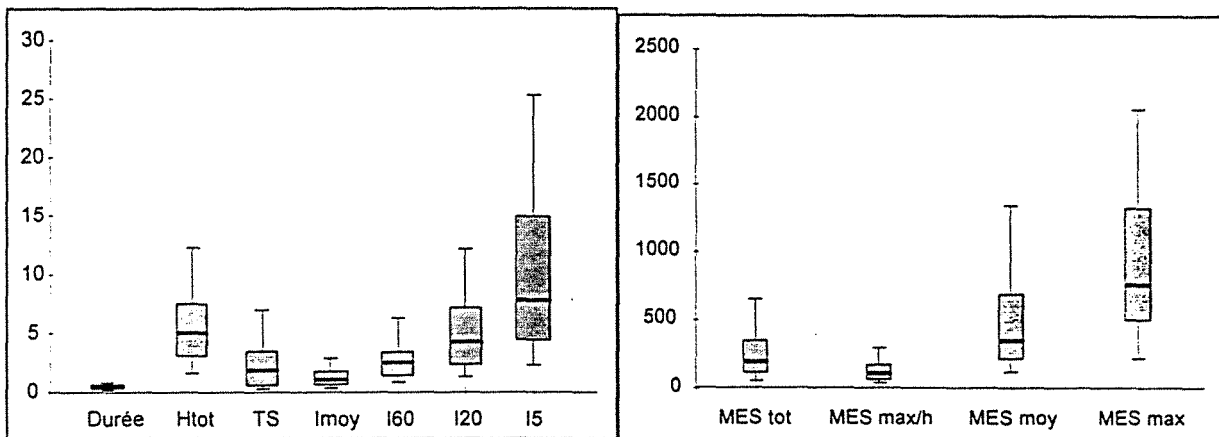
2.1.1. Description générale de l'échantillon de pollution

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 | l moy | l60 | l20 | l5 | 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.

2.21. 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.

2.22. 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 :

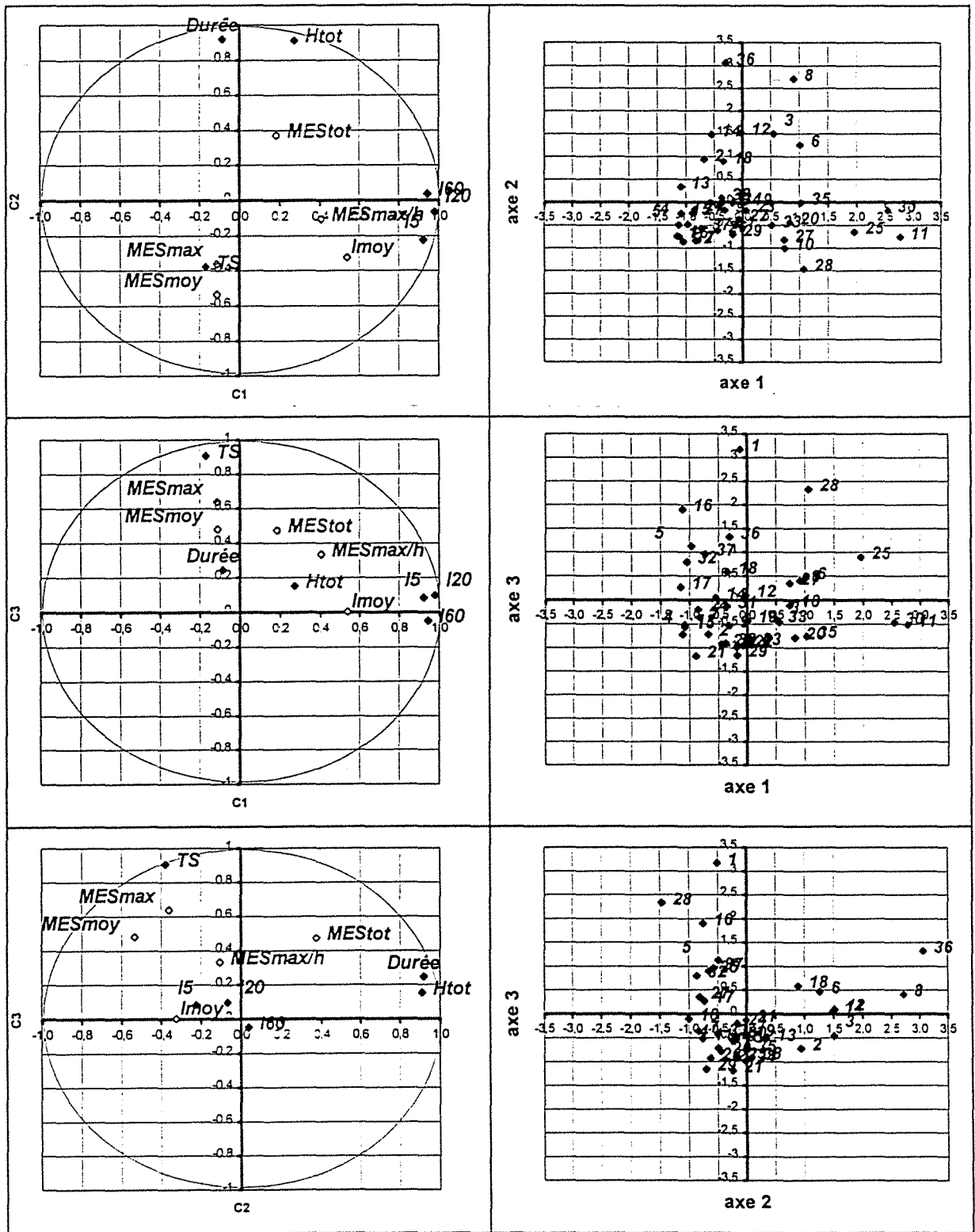
- ⇒ 47% pour la première composante,
- ⇒ 31% pour la deuxième composante,
- ⇒ 15% pour la troisième composante.

➤ 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.

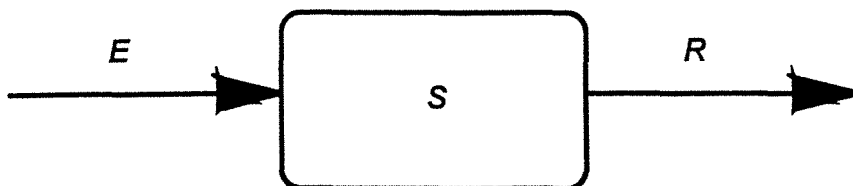


Figure IV.1 : Représentation schématique d'un modèle.

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.

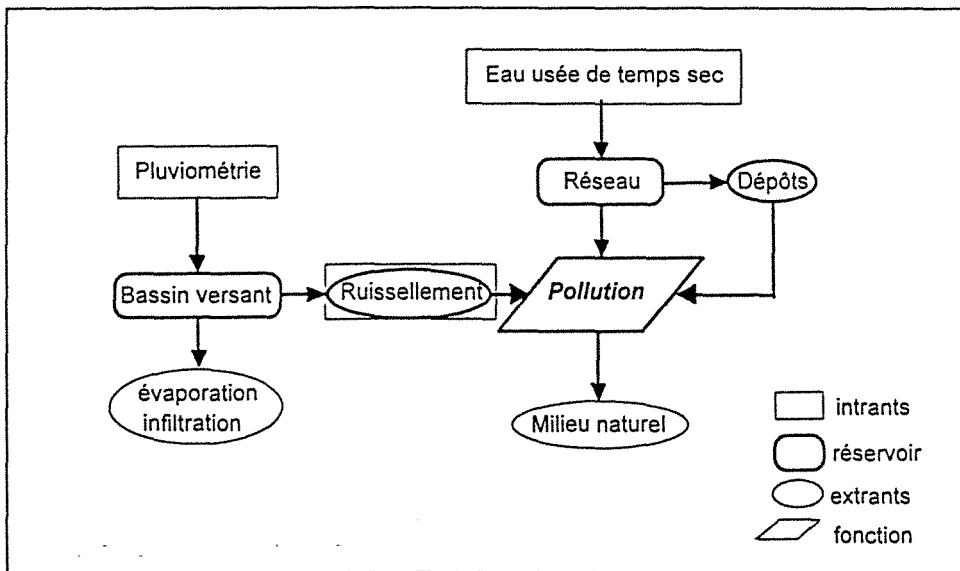


Figure IV.2 : Représentation très simplifiée des différents mécanismes producteurs de pollution en assainissement urbain.

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.

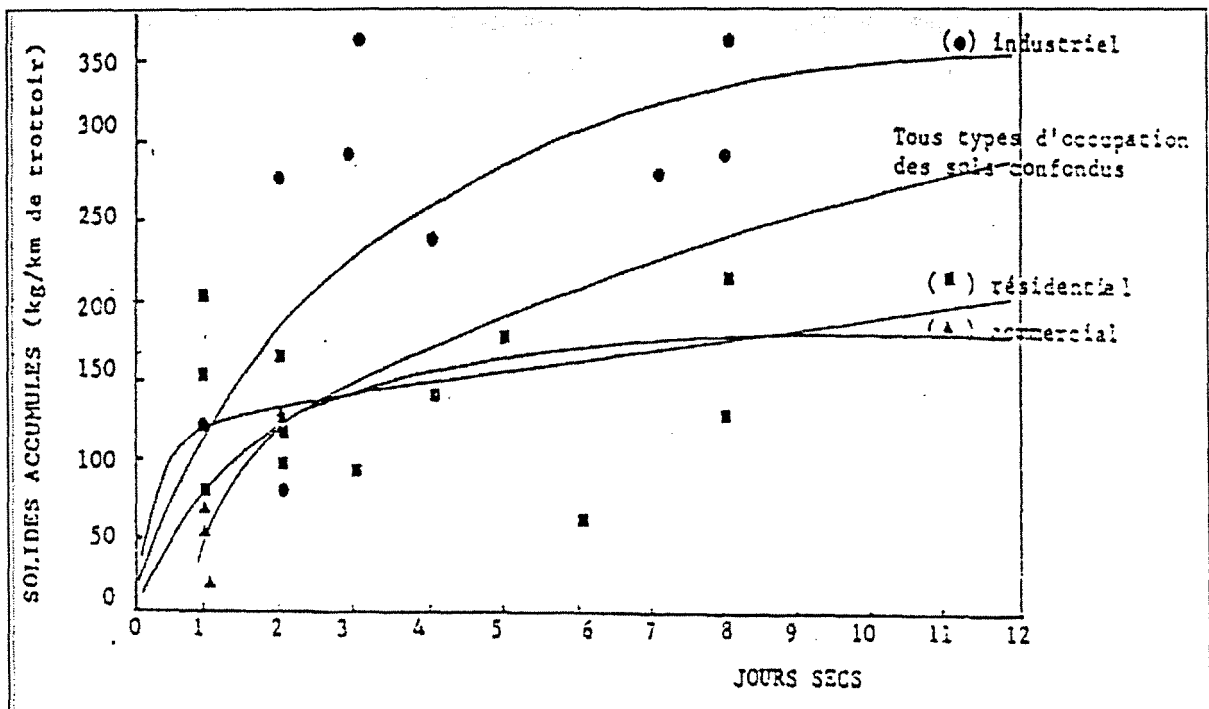


Figure IV.3 : Accumulation des solides dans les rues en fonction de la durée depuis la dernière pluie ou le dernier lavage.

↳ 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 :

$$M = K * M_0^a * I_{max5}^b * V_r^c$$

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_{max5} = 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 | $MES_{tot} = K \left(\frac{A}{0,08} (1 - \exp(-0,08 TS)) \right)^b * I^c * V_r^d + \alpha * TS^k + m_{durée}$ |
| Servat-Servat | $MES_{tot} = K (A' TS)^b * I^c * V_r^d + \alpha * TS^k + m_{durée}$ |

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.

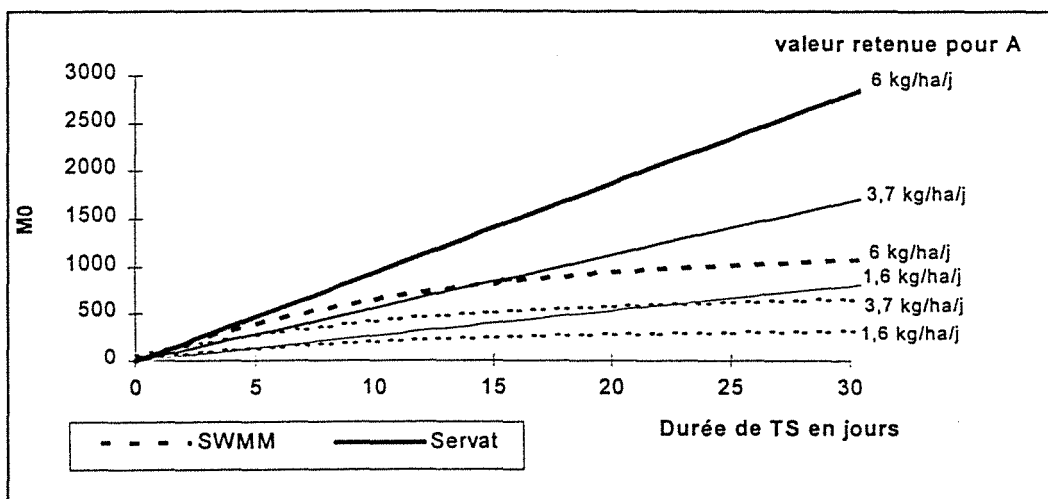


Figure IV.4 : Comparaison des variations de M_0 suivant l'usage du modèle SWMM ou Servat et selon la valeur retenue pour A

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 2.42, 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.

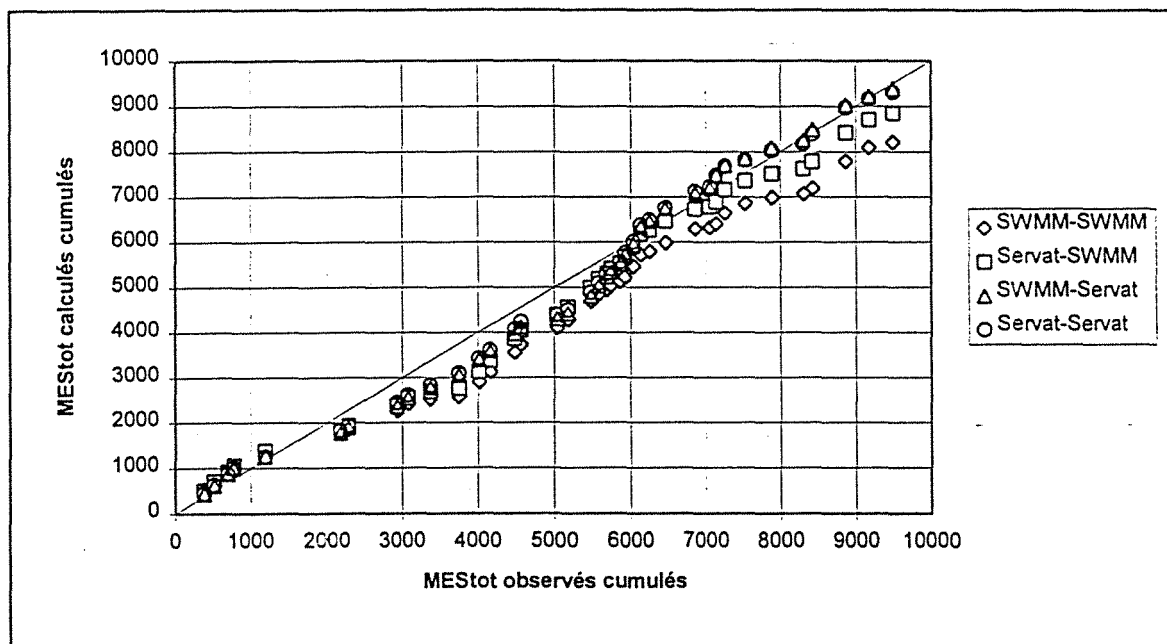


Figure V.1 : Comparaison des modèles calés pour MEstot sur un échantillon de 38 valeurs

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".

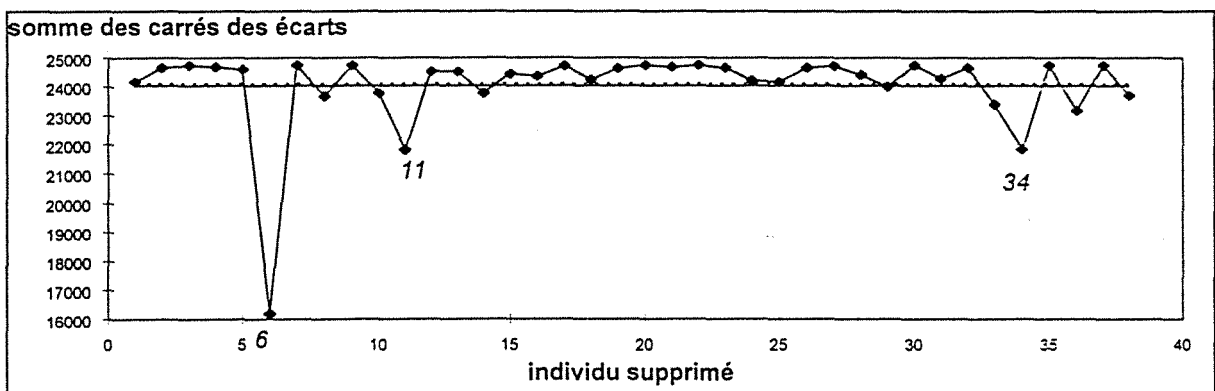


Figure V.2 : Variation de la somme des carrés des écarts après suppression d'un individu sur l'échantillon de MESTot

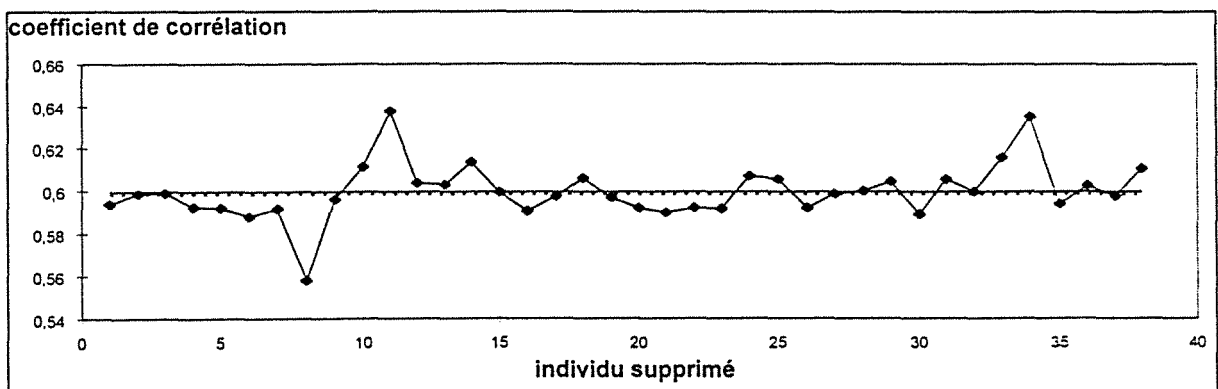


Figure V.3 : Variation du coefficient de corrélation après suppression d'un individu sur l'échantillon de MESTot

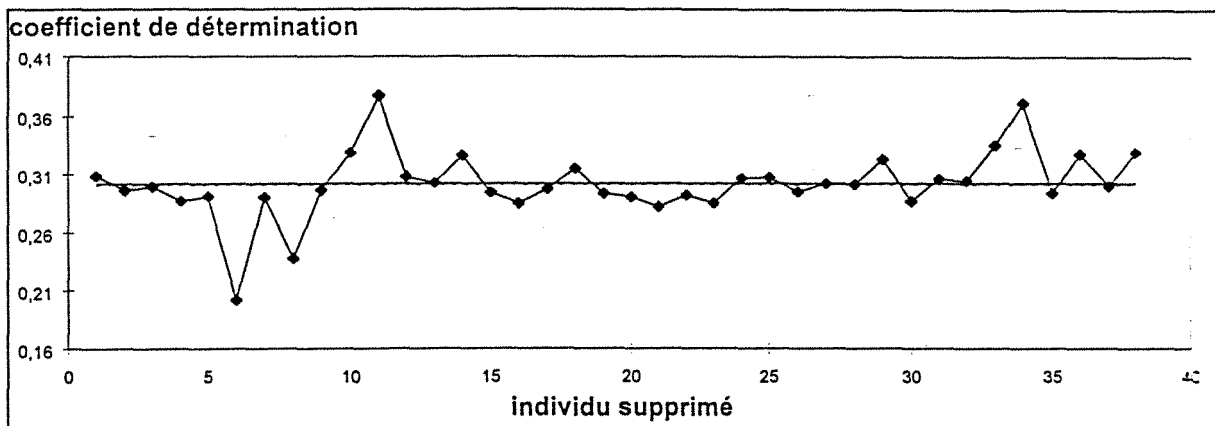


Figure V.4 : Variation du coefficient de détermination après suppression d'un individu sur l'échantillon de MESTot

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.

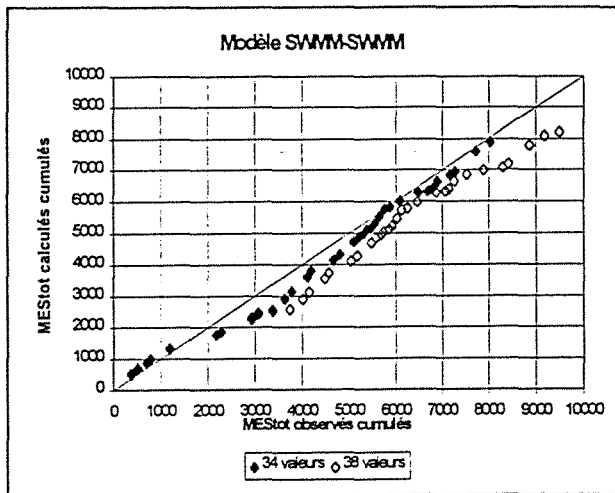


Figure V.5 : Modèle SWMM-SWMM calé sur un échantillon de MESTot réduit

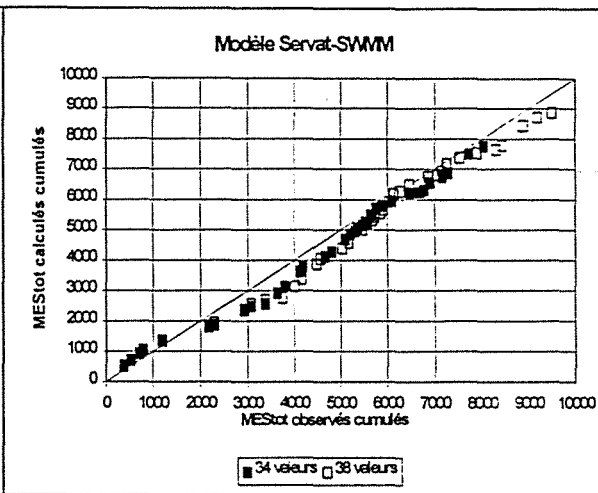


Figure V.6 : Modèle Servat-SWMM calé sur un échantillon de MESTot réduit

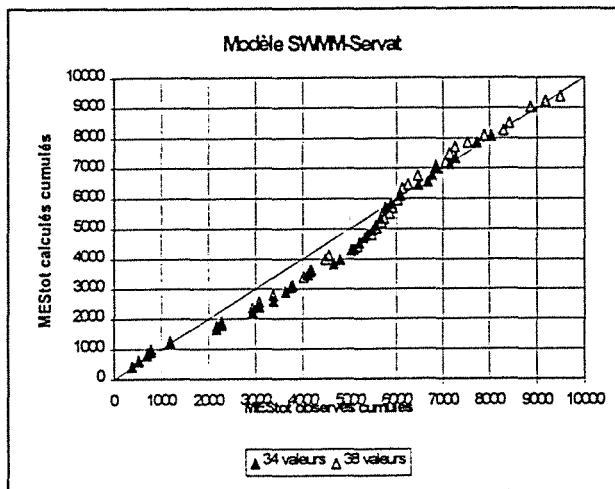


Figure V.7 : SWMM-Servat calé sur un échantillon de MESTot réduit

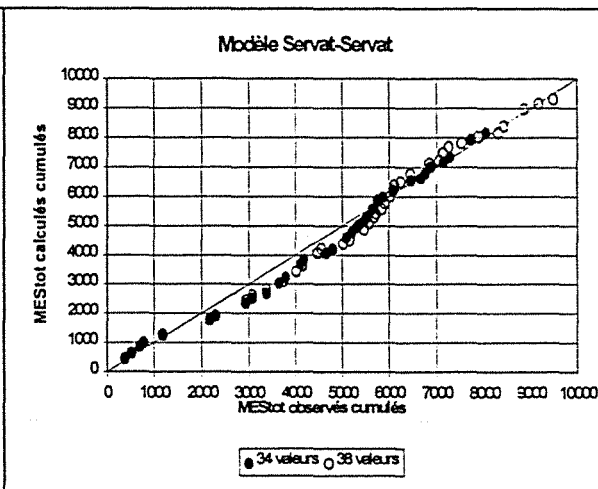


Figure V.8 : Modèle Servat-Servat calé sur un échantillon de MESTot réduit

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.

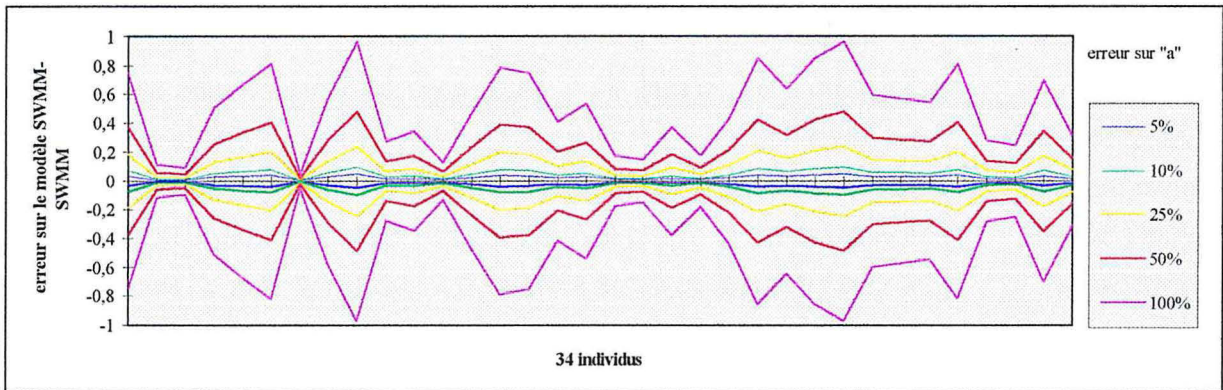


Figure V.9 : Répercussion des erreurs sur "a1" dans la prédiction des MESTot par le modèle SWMM-SWMM

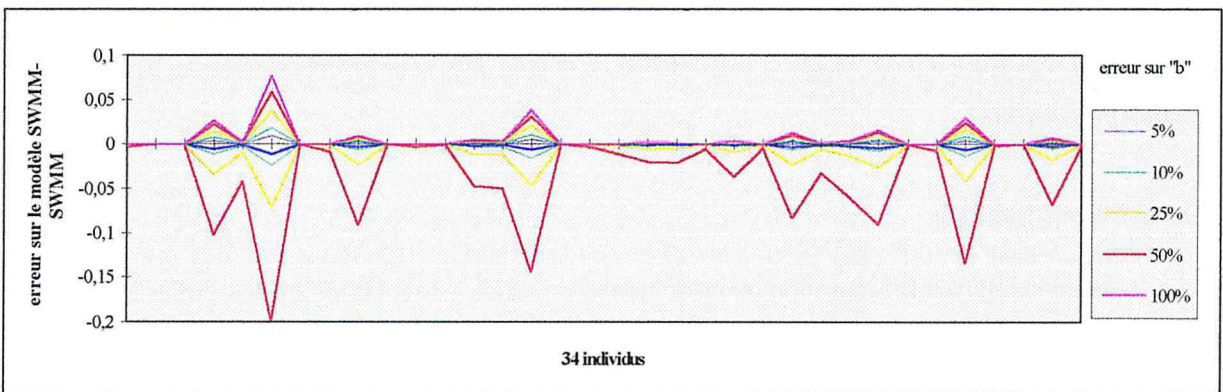


Figure V.10 : Répercussion des erreurs sur "b1" dans la prédiction des MESTot par le modèle SWMM-SWMM

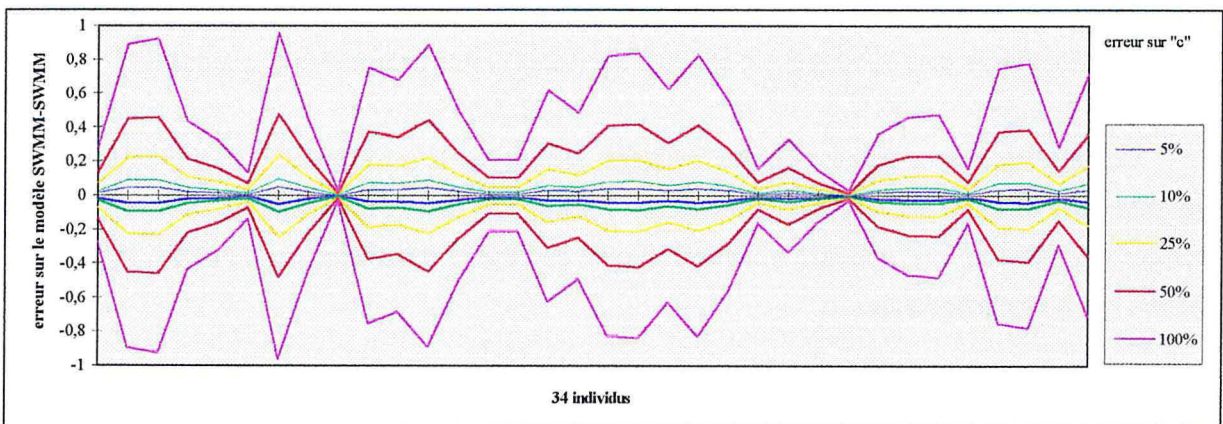


Figure V.11 : Répercussion des erreurs sur "c1" dans la prédiction des MESTot par le modèle SWMM-SWMM

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.

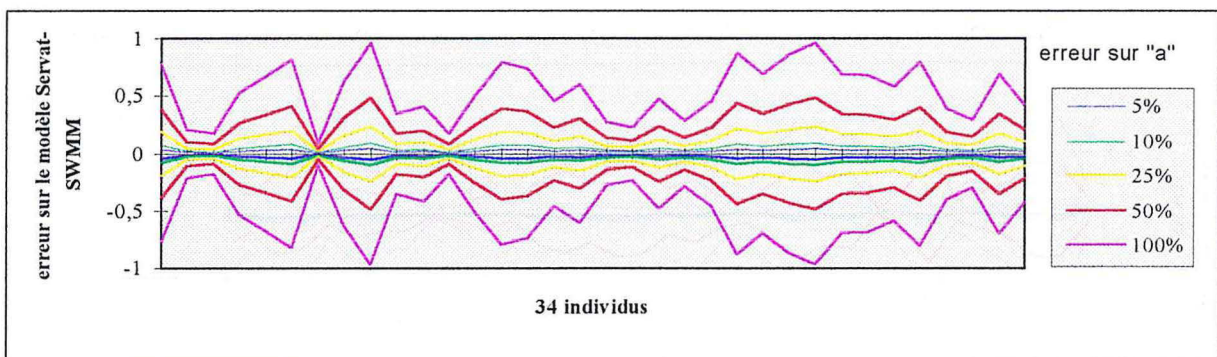


Figure V.12 : Répercussion des erreurs sur "a2" dans la prédiction des MESTot par le modèle Servat-SWMM

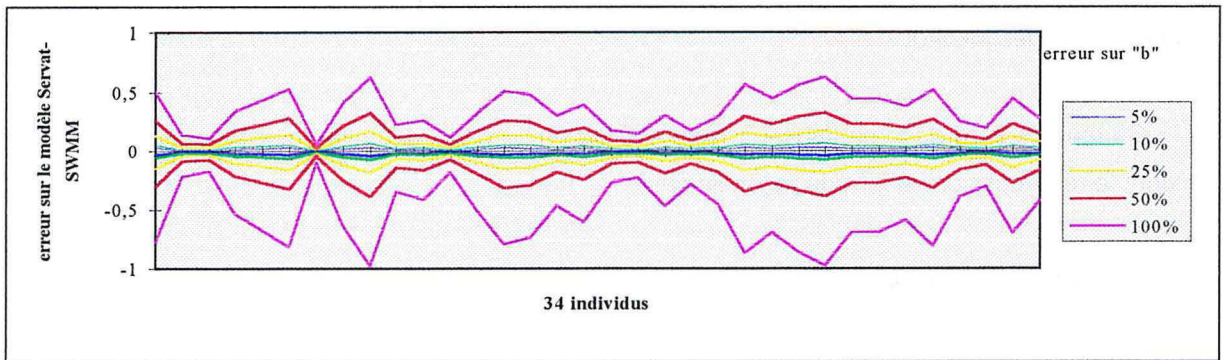


Figure V.13 : Répercussion des erreurs sur "b2" dans la prédiction des MESTot par le modèle Servat-SWMM

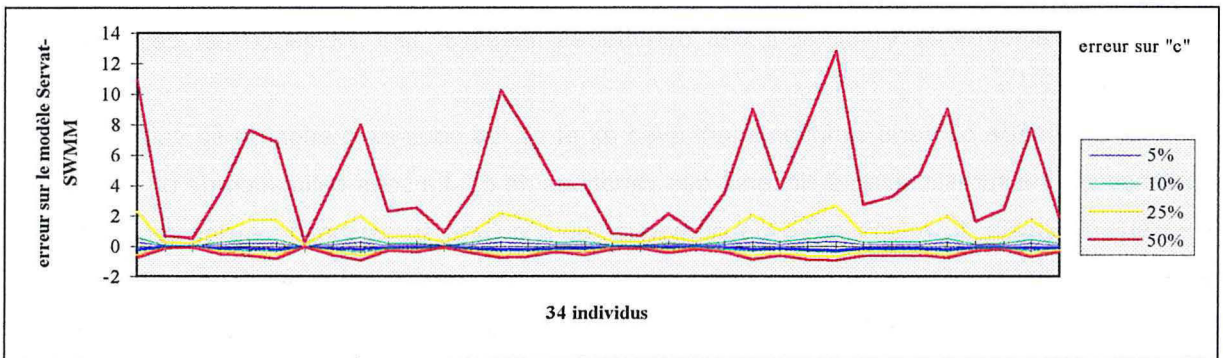


Figure V.14 : Répercussion des erreurs sur "c2" dans la prédiction des MESTot par le modèle Servat-SWMM

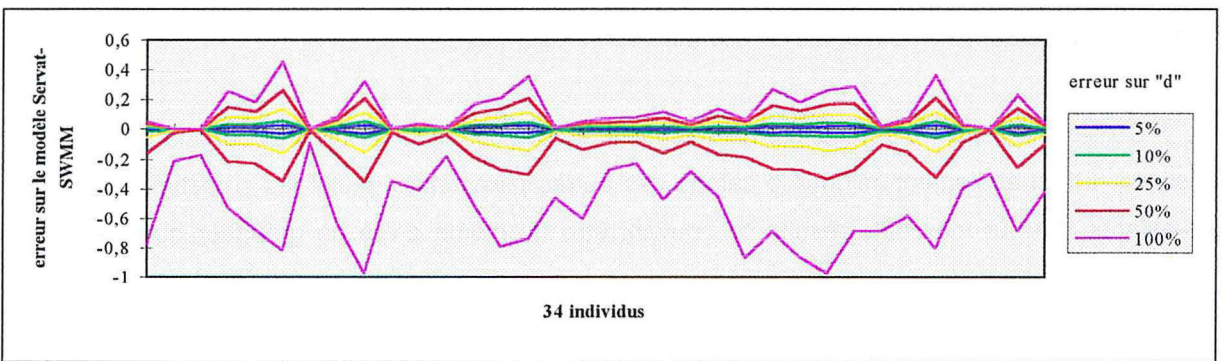


Figure V.15 : Répercussion des erreurs sur "d2" dans la prédiction des MESTot par le modèle Servat-SWMM

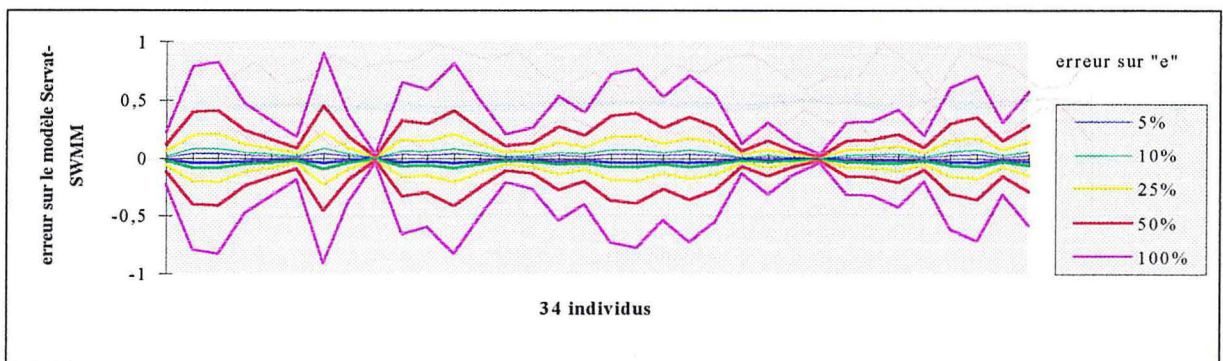


Figure V.16 : Répercussion des erreurs sur "e2" dans la prédiction des MESTot par le modèle Servat-SWMM

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.

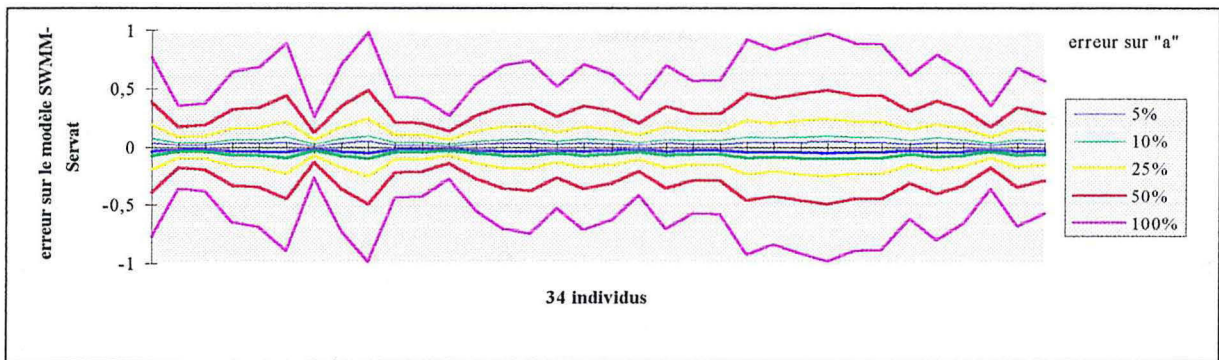


Figure V.17 : Répercussion des erreurs sur "a3" dans la prédiction des $MESTot$ par le modèle SWMM-Servat

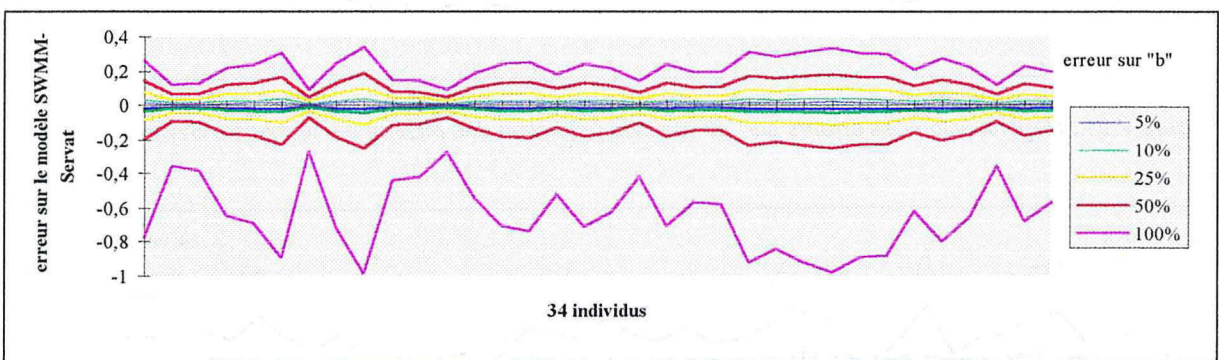


Figure V.18 : Répercussion des erreurs sur "b3" dans la prédiction des $MESTot$ par le modèle SWMM-Servat

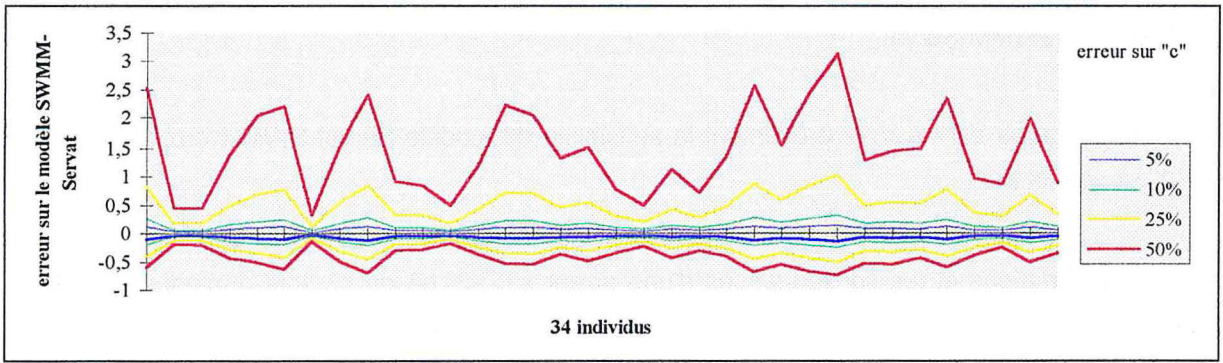


Figure V.19 : Répercussion des erreurs sur "c3" dans la prédiction des MESTot par le modèle SWMM-Servat

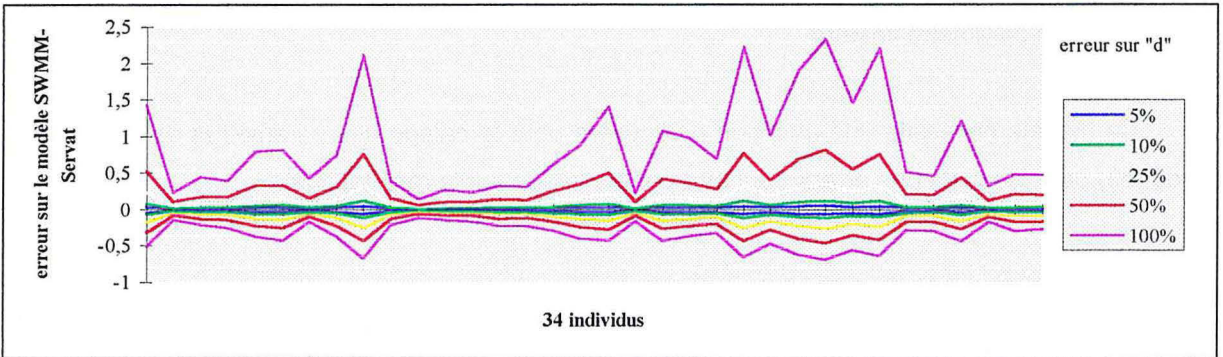


Figure V.20 : Répercussion des erreurs sur "d3" dans la prédiction des MESTot par le modèle SWMM-Servat

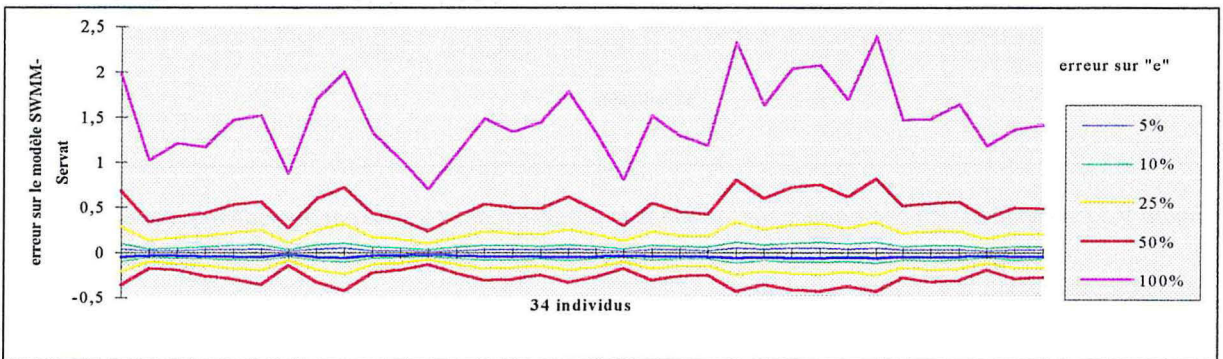


Figure V.21 : Répercussion des erreurs sur "e3" dans la prédiction des MESTot par le modèle SWMM-Servat

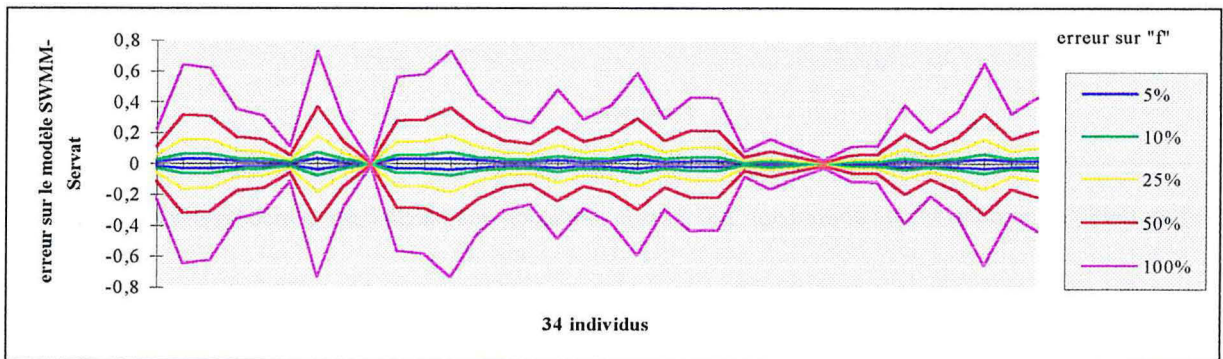


Figure V.22 : Répercussion des erreurs sur "f3" dans la prédiction des MESTot par le modèle SWMM-Servat

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.

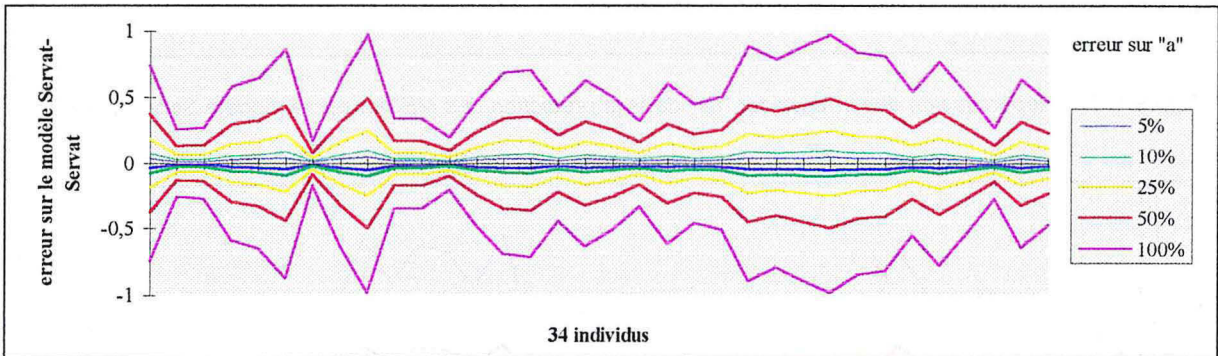


Figure V.23 : Répercussion des erreurs sur "a4" dans la prédiction des MEstot par le modèle Servat-Servat

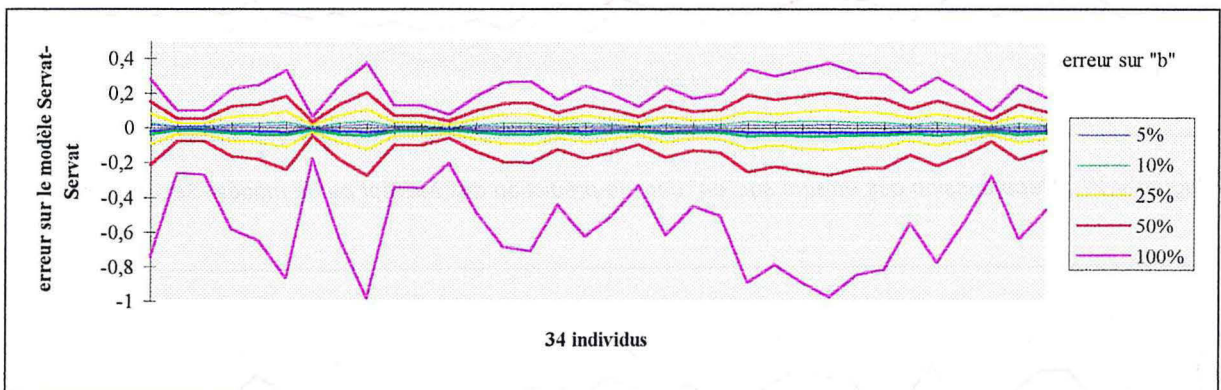


Figure V.24 : Répercussion des erreurs sur "b4" dans la prédiction des MEstot par le modèle Servat-Servat

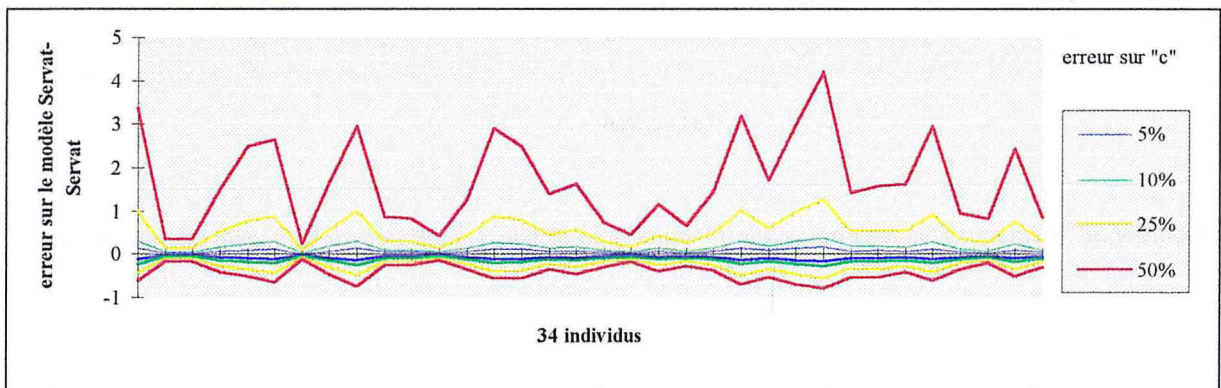


Figure V.25 : Répercussion des erreurs sur "c4" dans la prédiction des MEstot par le modèle Servat-Servat

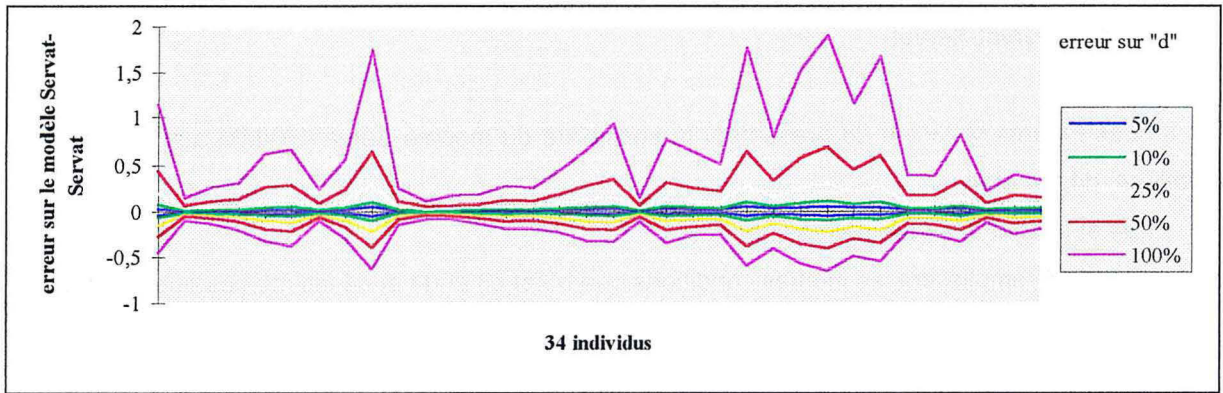


Figure V.26 : Répercussion des erreurs sur "d4" dans la prédiction des MESTot par le modèle Servat-Servat

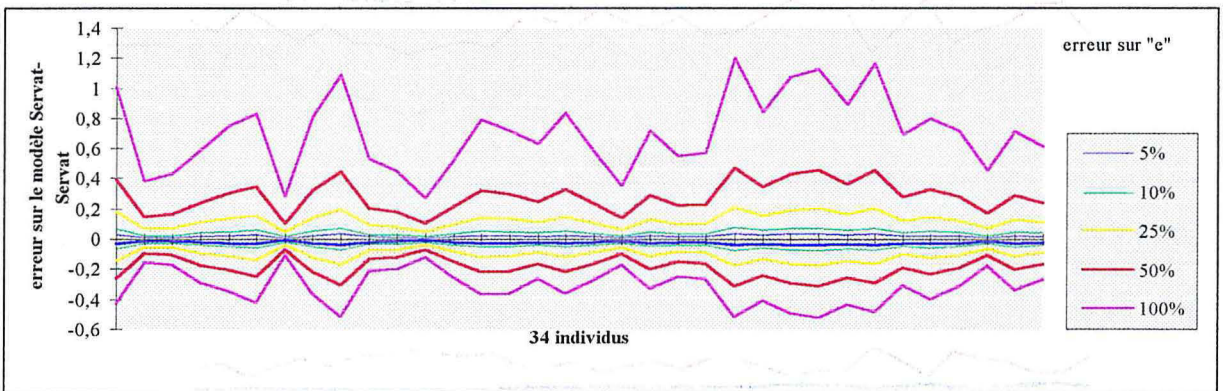


Figure V.27 : Répercussion des erreurs sur "e4" dans la prédiction des MESTot par le modèle Servat-Servat

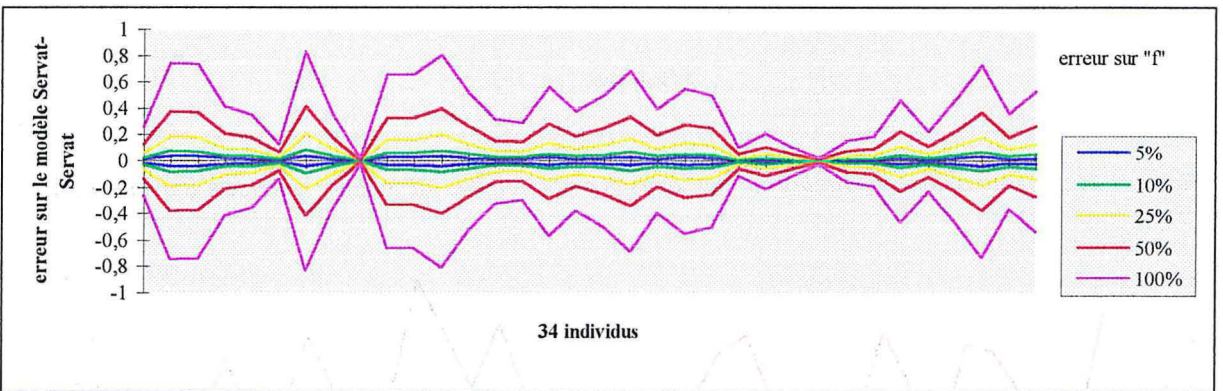


Figure V.28 : Répercussion des erreurs sur "f4" dans la prédiction des MESTot par le modèle Servat-Servat

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) | | | | | | | | |
|----------------|------------|------|------|-----------------|------------|------------|------|-----------------|--------|------------|------------|-------------------|------|--------|------------|------------|------|------|--------|------------|
| MESmax/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 |
| MESmoy | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 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 |
| MESmax | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 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 MES_{tot} (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 MES_{moy} les fourchettes obtenues pour l'apport de temps sec (paramètres c1, e1, f3 et f4) sont moins étendues que pour les MES_{tot}. 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 MES_{max} 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 MES_{max/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.

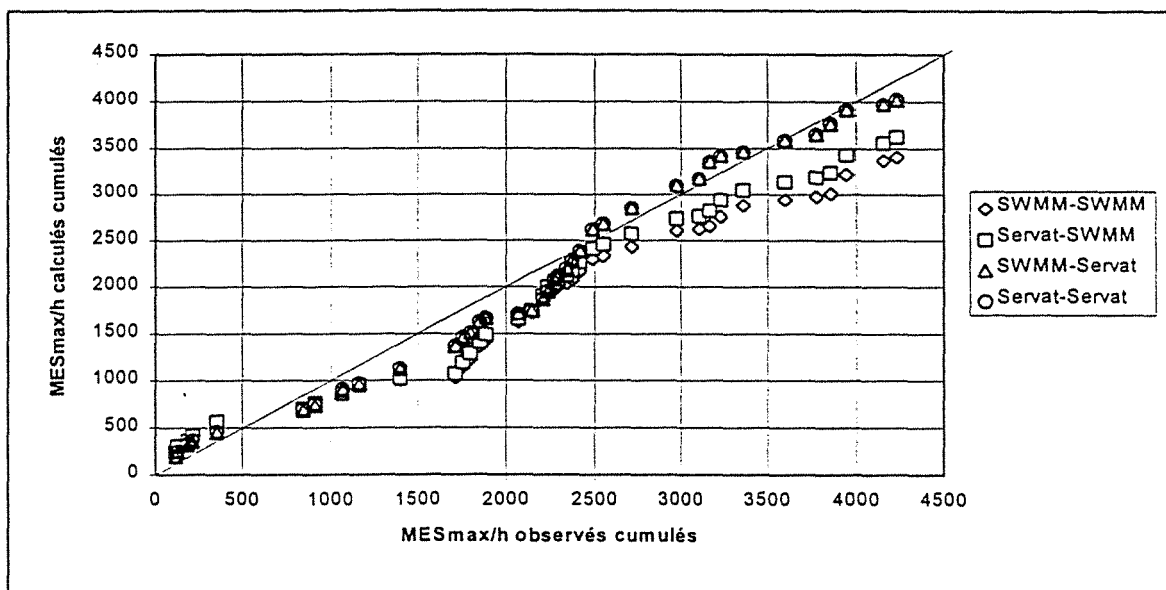


Figure V.29 : Comparaison des modèles calés pour MES_{max/h} sur un échantillon de 38 valeurs

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.

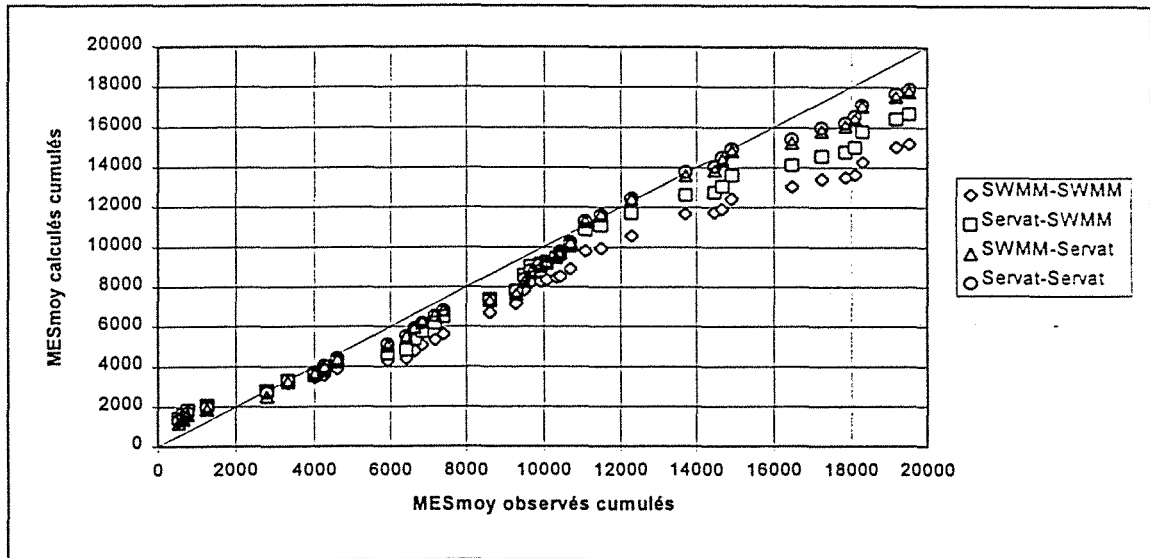


Figure V.30 : Comparaison des modèles calés pour MES_{moy} sur un échantillon de 38 valeurs

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.

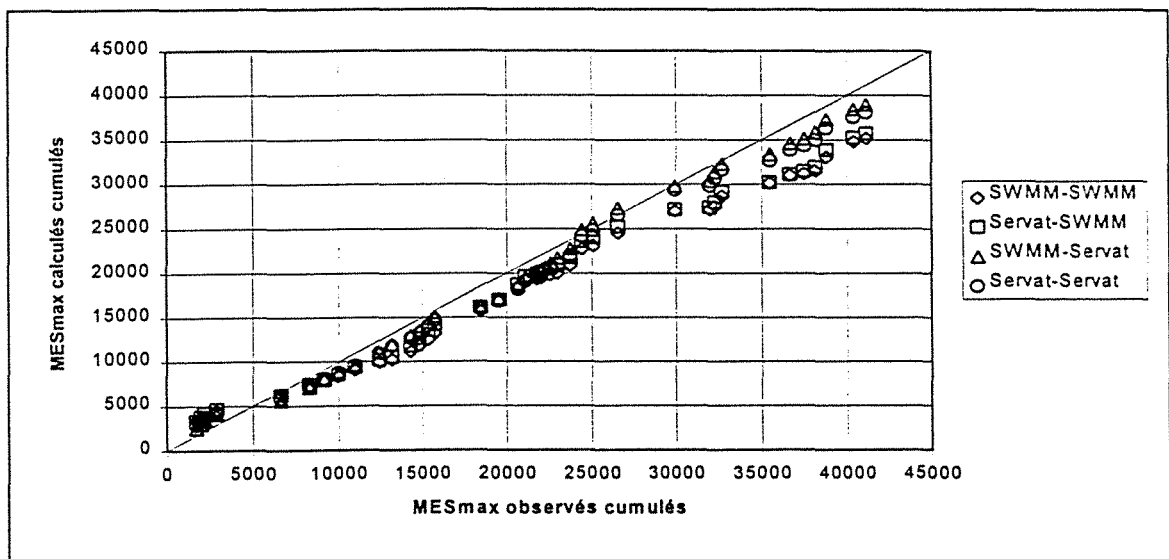


Figure V.31 : Comparaison des modèles calés pour MES_{max} sur un échantillon de 38 valeurs

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.

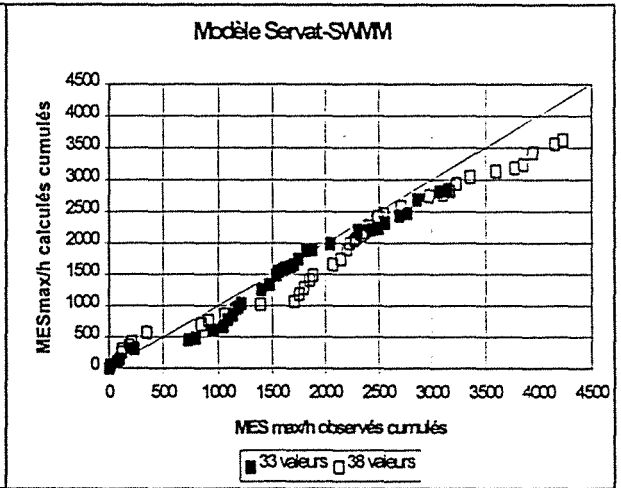
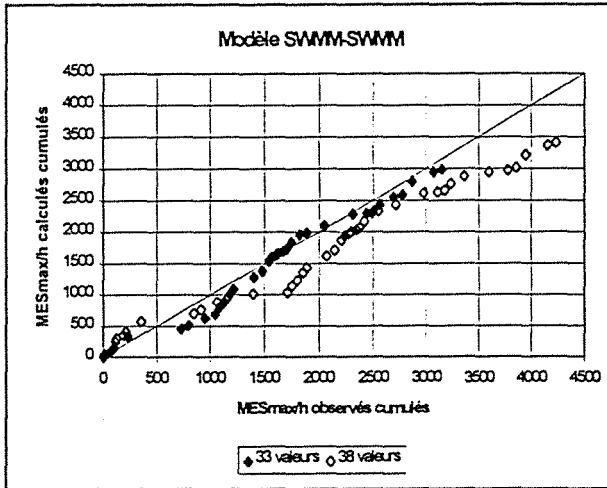


Figure V.32 : Modèle SWMM-SWMM calé sur un échantillon de MESmax/h réduit

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

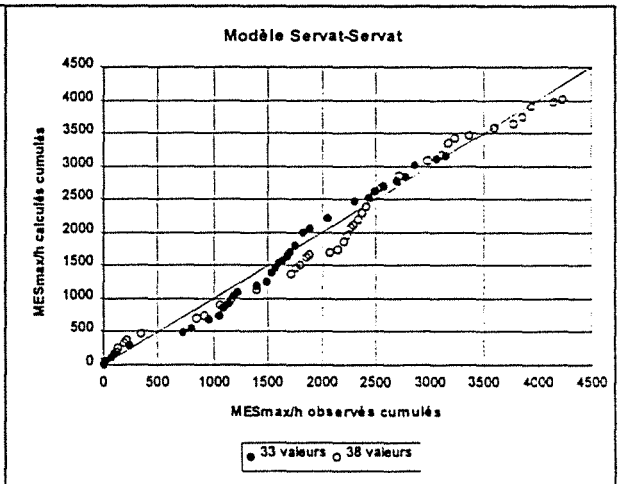
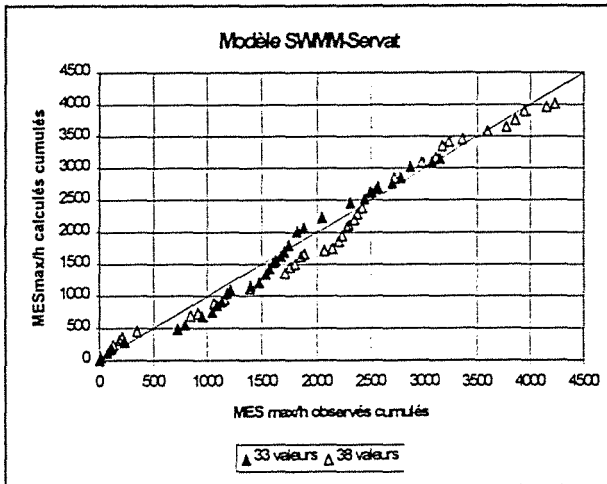


Figure V.34 : Modèle SWMM-Servat calé sur un échantillon de MESmax/h réduit

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.

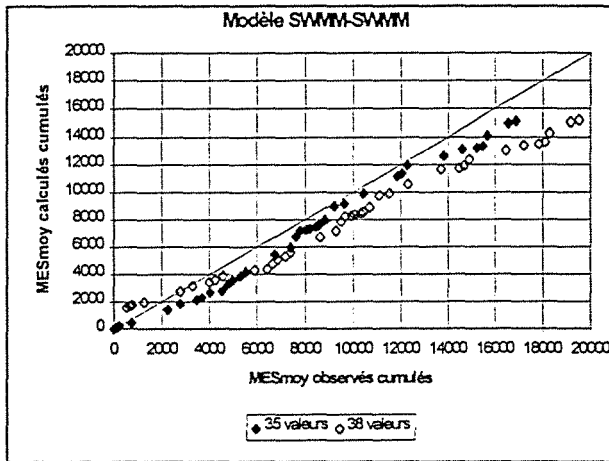


Figure V.36 : Modèle SWMM-SWMM calé sur un échantillon de MESmoy réduit

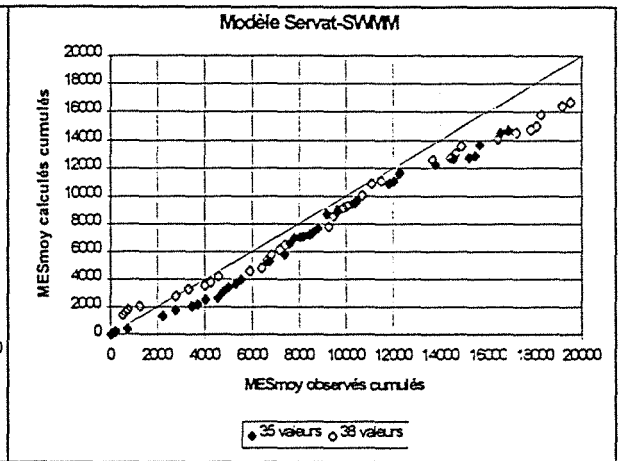


Figure V.37 : Modèle Servat-SWMM calé sur un échantillon de MESmoy réduit

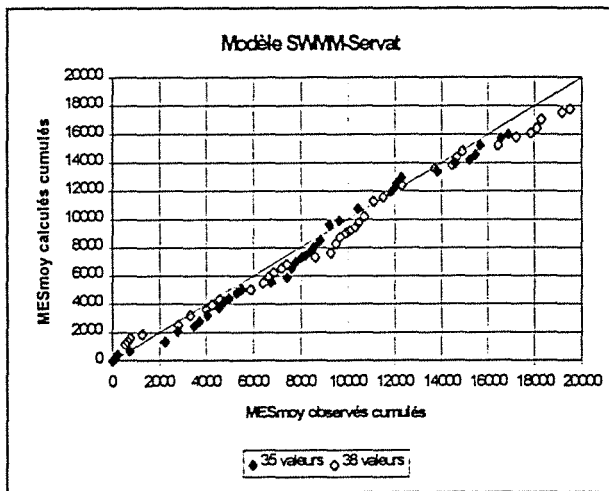


Figure V.38 : Modèle SWMM-Servat calé sur un échantillon de MESmoy réduit

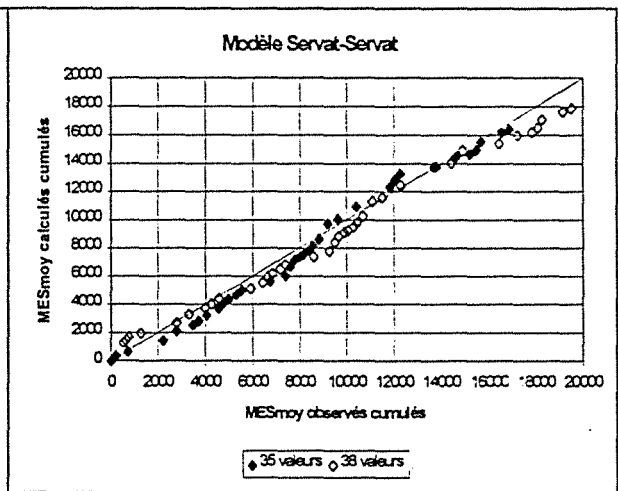


Figure V.39 : Modèle Servat-Servat calé sur un échantillon de MESmoy réduit

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%.

| MESmoy | 1=542 | | | 10=1331 | | | 29=761 | | |
|---------------|-------|--------|--------|---------|-------|-------|--------|-------|-------|
| | e sup | 38 | 35 | e sup | 38 | 35 | e sup | 38 | 34 |
| SWMM-SWMM | 48,5 | 1549,5 | 1812,2 | -9,2 | 397,1 | 519,8 | -1,4 | 70,0 | 80,7 |
| Servat-SWMM | 144,4 | 1420,6 | 2203,5 | 0,2 | 402,4 | 399,7 | -72,7 | 124,4 | 677,8 |
| SWMM-Servat | 4,8 | 1188,3 | 1214,3 | -1,1 | 689,0 | 704,2 | -0,7 | 257,4 | 263,1 |
| Servat-Servat | 15,1 | 1313,4 | 1395,3 | -2,8 | 696,3 | 732,9 | -1,3 | 255,1 | 265,1 |

emoyen 10,3

emax 144,4

Tableau V.8 : Erreur supplémentaire de prédiction sur les trois individus exclus de l'échantillon

➤ Particularités liées aux MESmax

Comparées aux résultats obtenus avec l'échantillon complet de pollution, les valeurs des paramètres de calage ont toute, cette fois, assez sensiblement évolué.

Considérant les fonctions carré des écarts, coefficient de corrélation et coefficient de détermination, les valeurs ont été considérablement améliorées pour l'ensemble des modèles.

Globalement les résultats sont meilleurs pour les modèles SWMM-SWMM et Servat-SWMM que pour les modèles SWMM-Servat et Servat-Servat.

Les coefficients de corrélation et de détermination sont convenables.

Les Figures V.40, V.41, V.42 et V.43 permettent la comparaison des modèles calés sur le nouvel échantillon avec ceux obtenus sur l'échantillon complet.

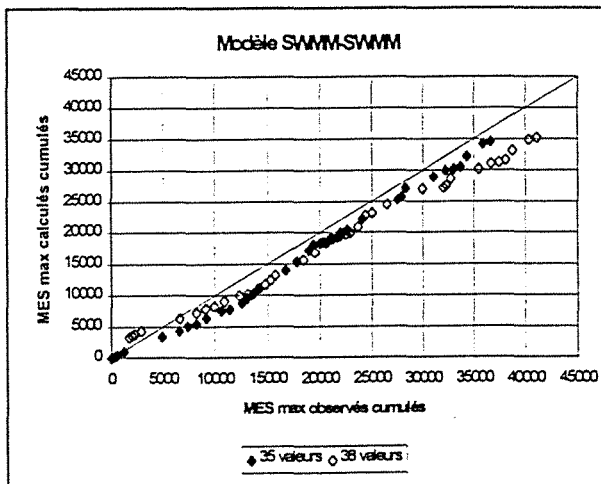


Figure V.40 : Modèle SWMM-SWMM calé sur un échantillon de MESmax réduit

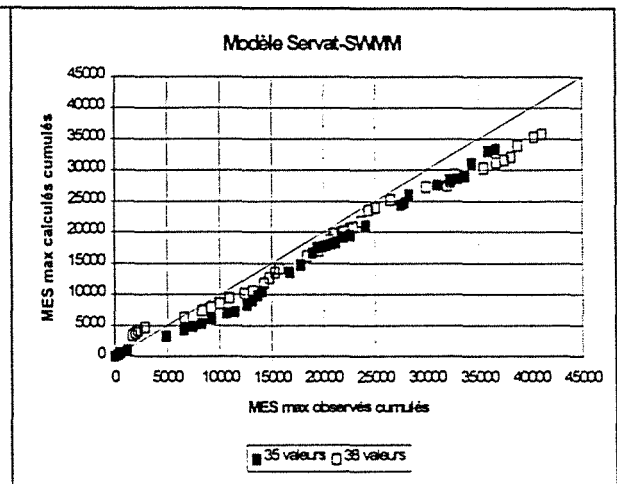


Figure V.41 : Modèle Servat-SWMM calé sur un échantillon de MESmax réduit

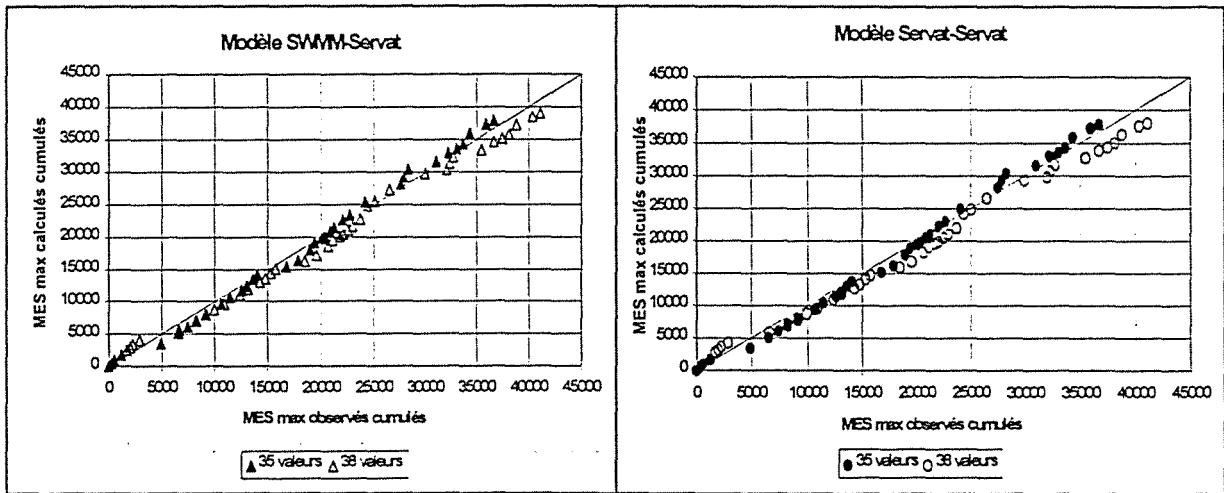


Figure V.42 : Modèle SWMM-Servat calé sur un échantillon de MESmax réduit

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.

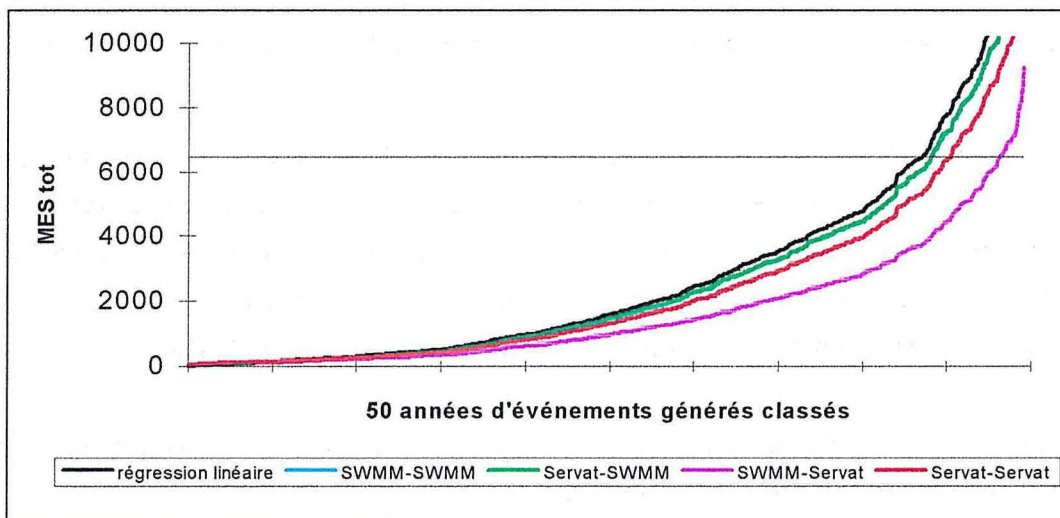


Figure V.44 : Génération de 50 années d'observations de MES_{tot} selon les divers modèles

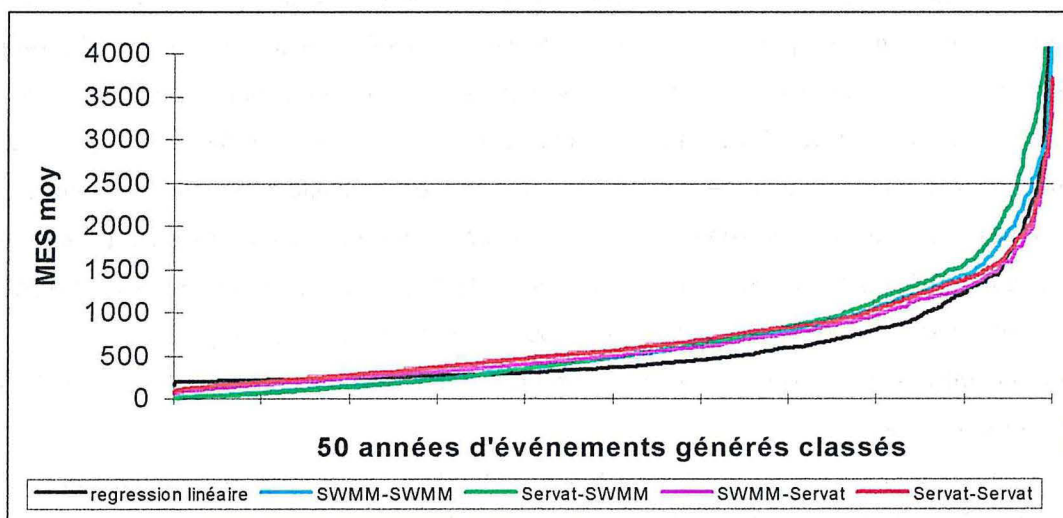


Figure V.45 : Génération de 50 années d'observations de MES_{moy} selon les divers modèles

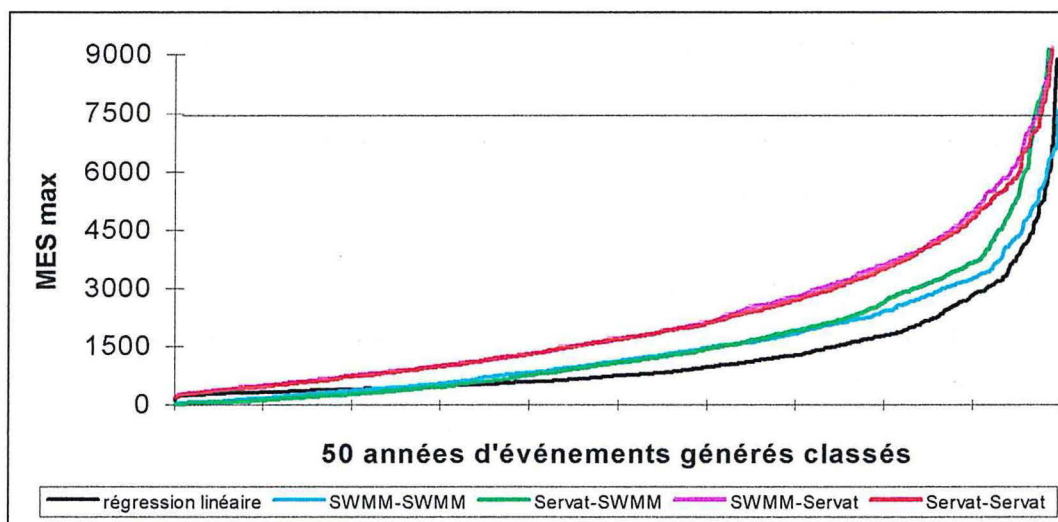


Figure V.46 : Génération de 50 années d'observations de MESmax selon les divers modèles

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.

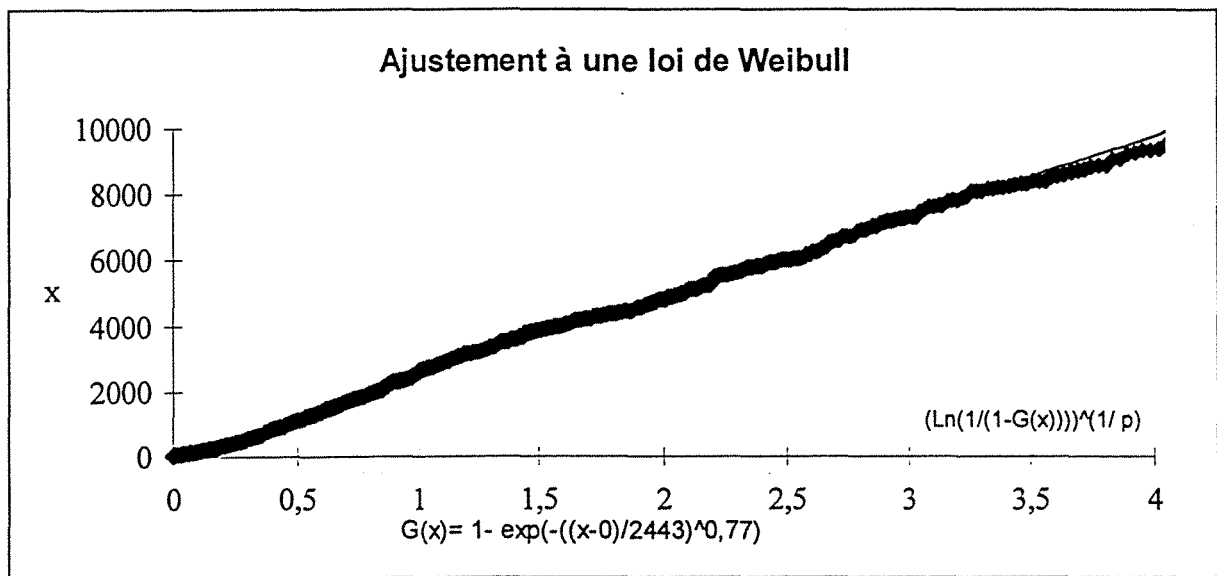


Figure V.47 : Ajustement à une loi de Weibull de l'échantillon de MESTot généré

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 DEB _{ut} 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 | 30/06/1987 | 10h00 | 01/07/1987 | 9h00 | | | | | | | |
| O10 | | | | | 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_mentaires :

| C1 | C 2 | C 3 |
|----|-----|-----|
|----|-----|-----|

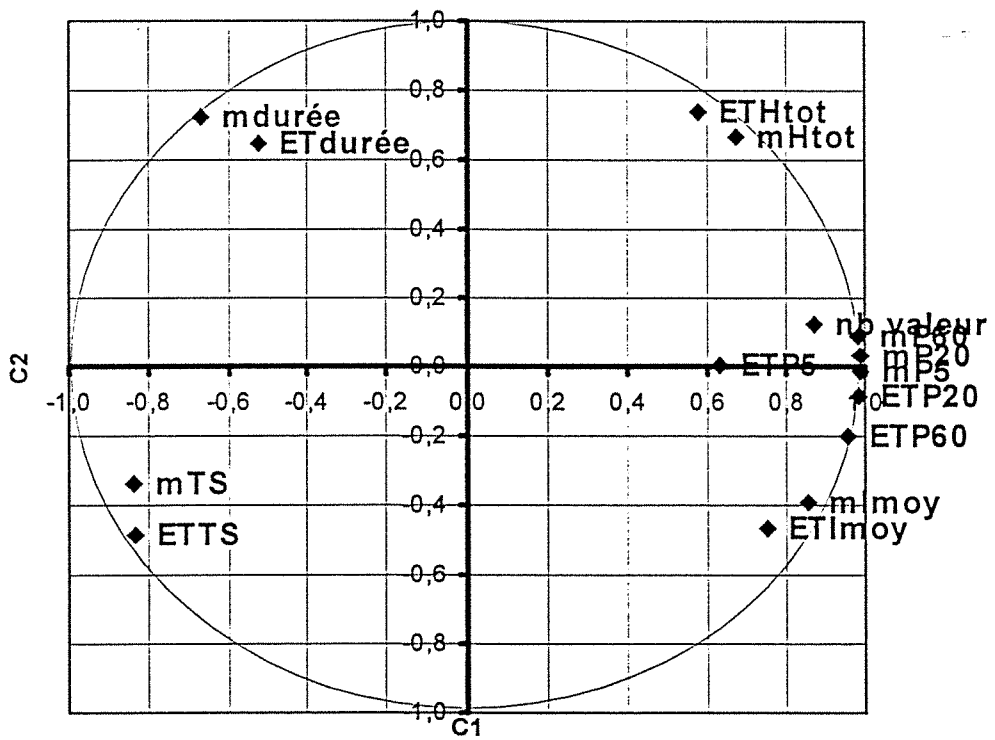
Projections des observations actives

| | 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 |

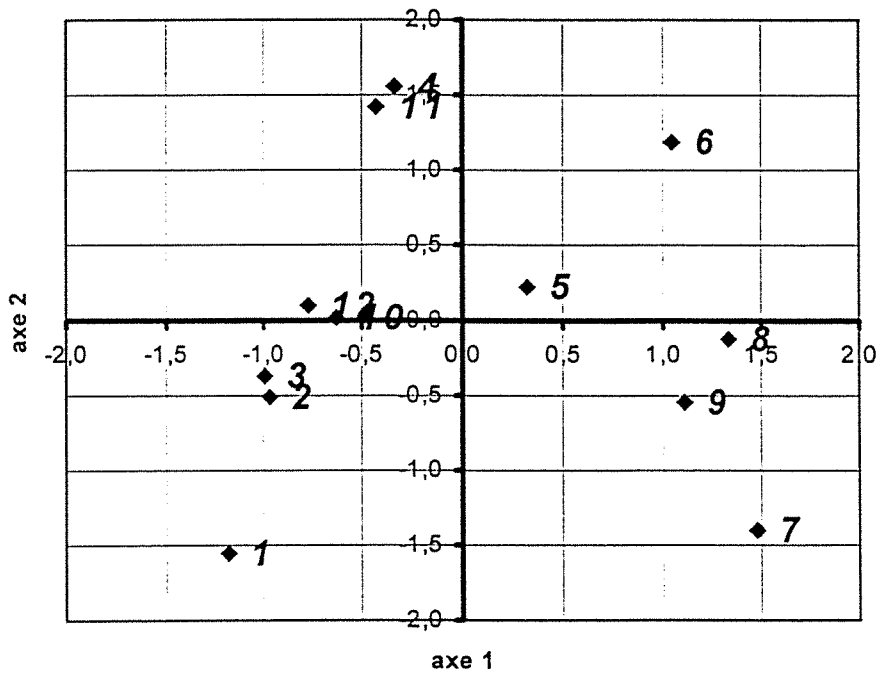
Projections des observations supplémentaires :

| C1 | C 2 | C 3 |
|----|-----|-----|
|----|-----|-----|

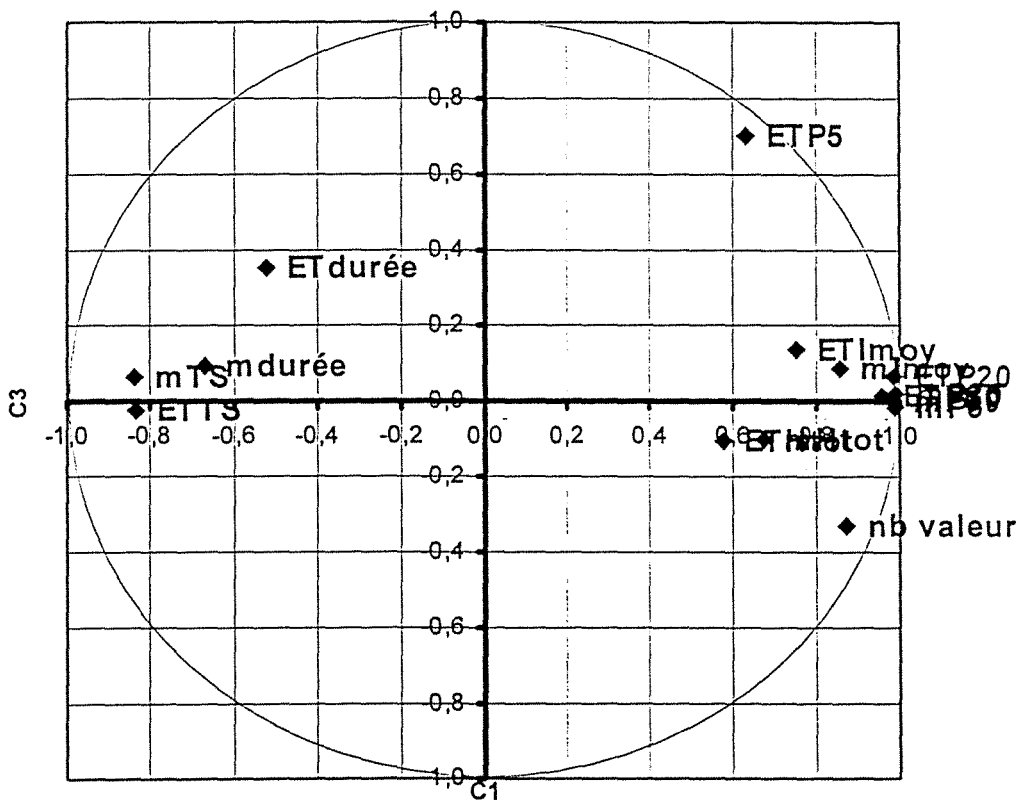
A.C.P. sur les moyennes et écarts-types mensuels
des variables de pluviométrie
Plan C1-C2



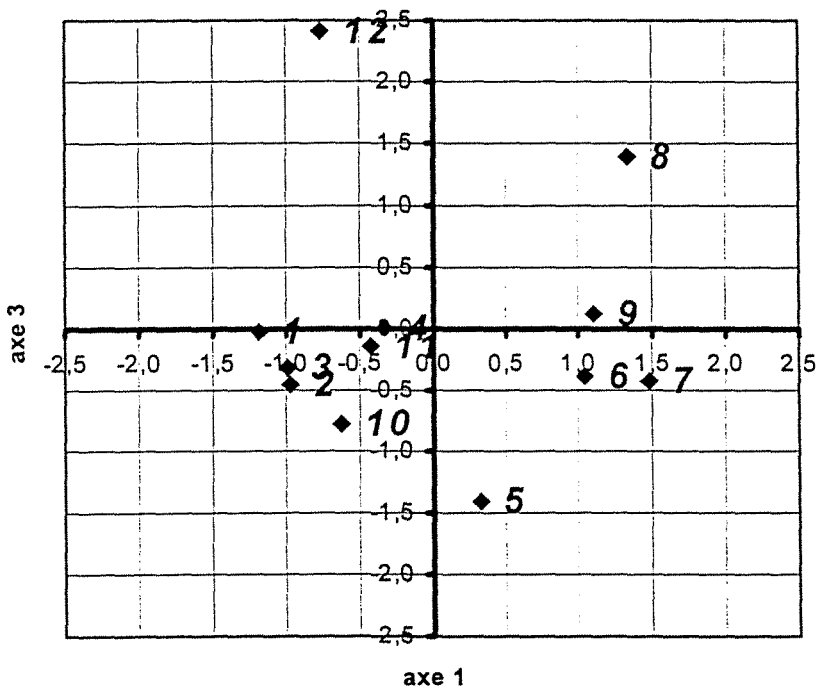
A.C.P. sur les moyennes et écarts-types mensuels
des variables de pluviométrie
axes 1-2



A.C.P. sur les moyennes et écarts-types mensuels
des variables de pluviométrie
Plan C1-C3

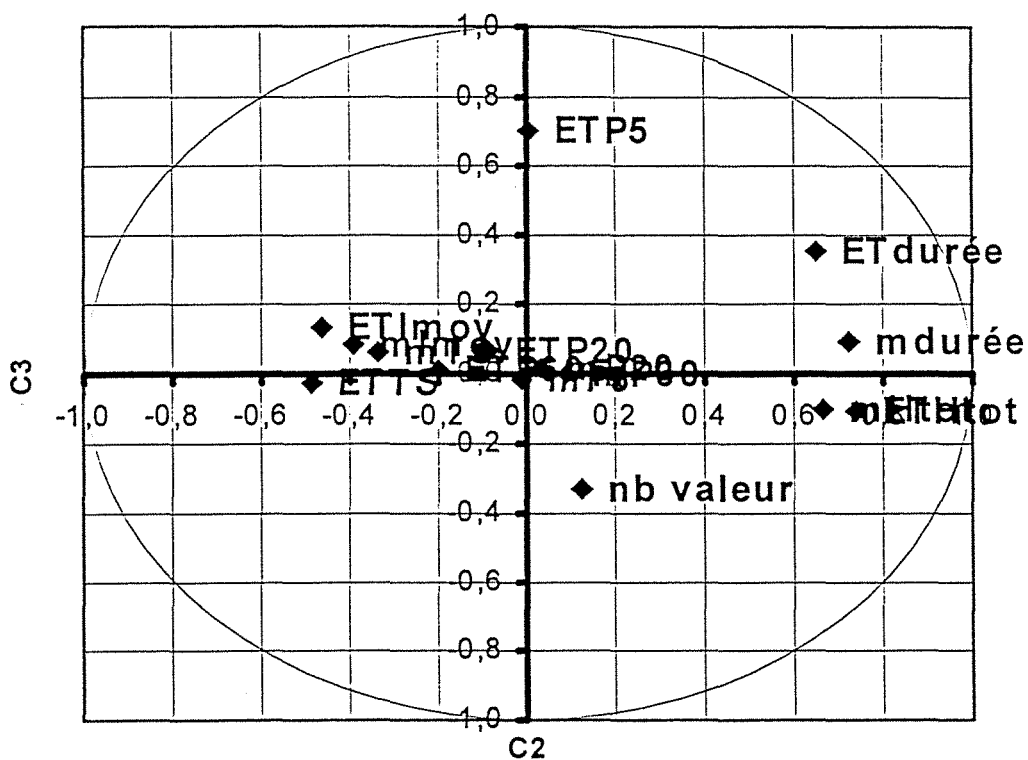


A.C.P. sur les moyennes et écarts-types mensuels
des variables de pluviométrie
axes 1-3



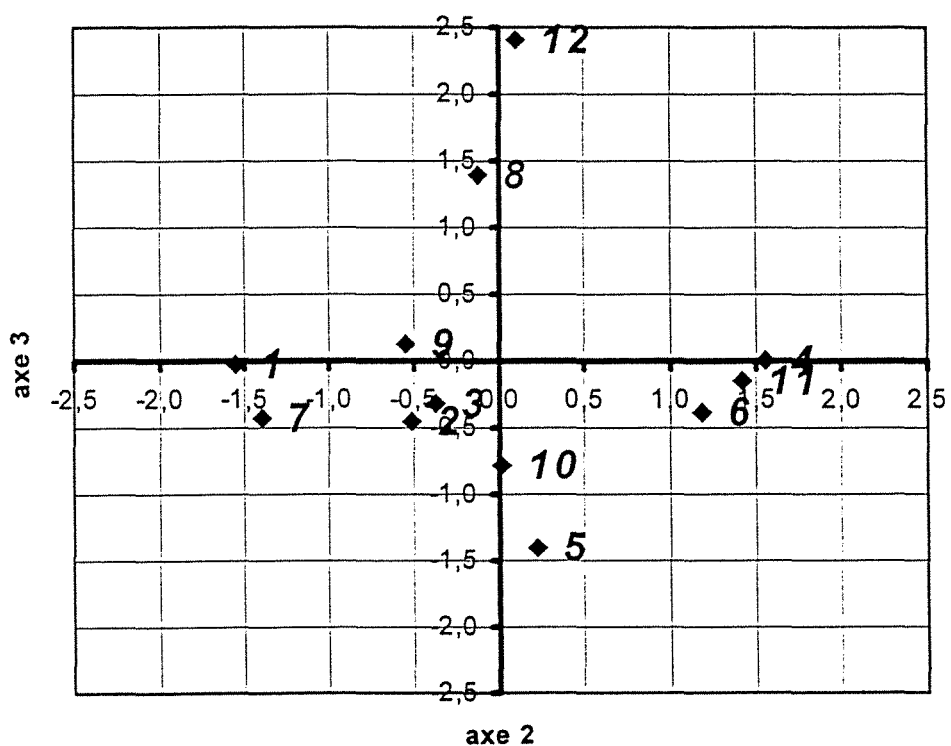
A.C.P. sur les moyennes et écarts-types mensuels
des variables de pluviométrie

Plan C2-C3



A.C.P. sur les moyennes et écarts-types mensuels
des variables de pluviométrie

axes 2-3



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)

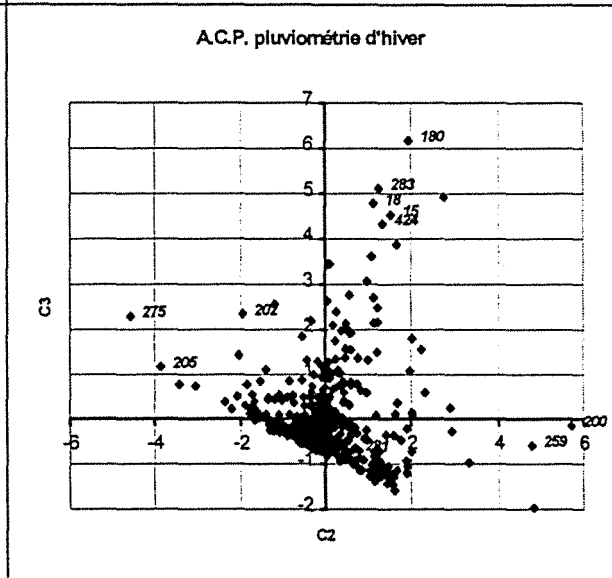
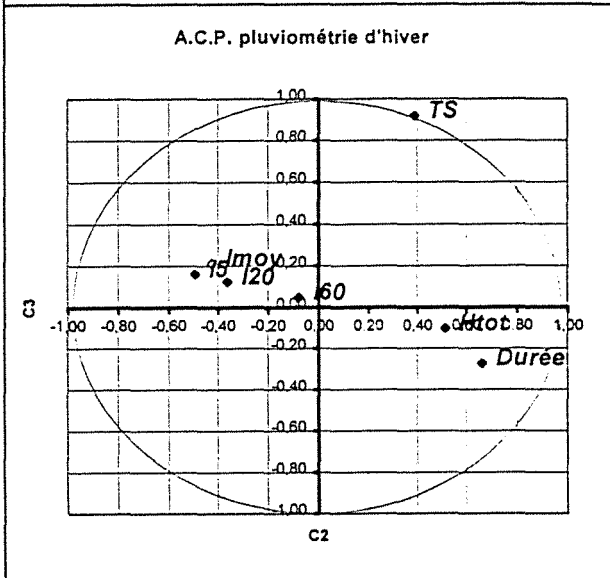
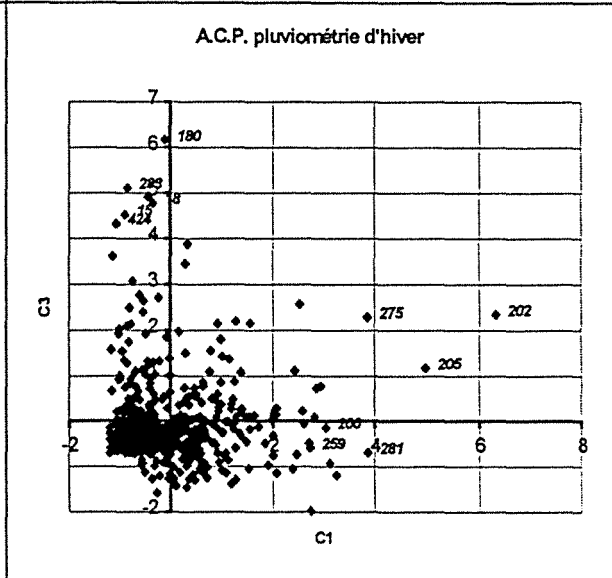
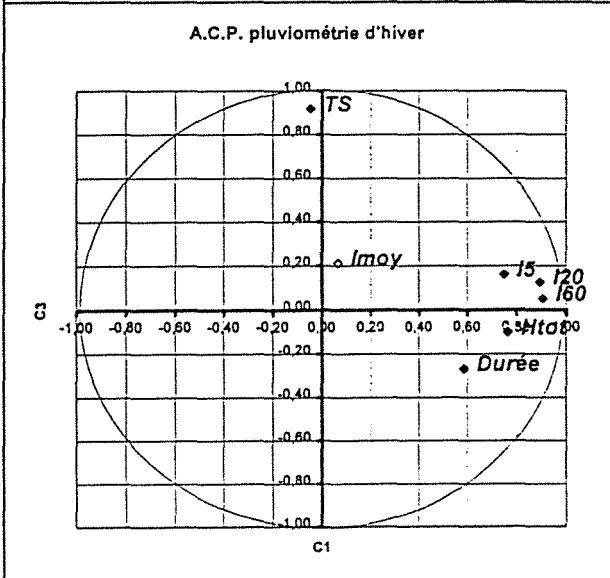
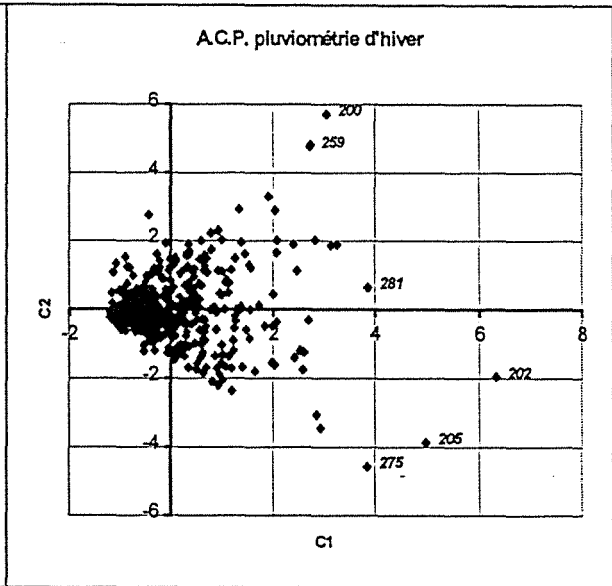
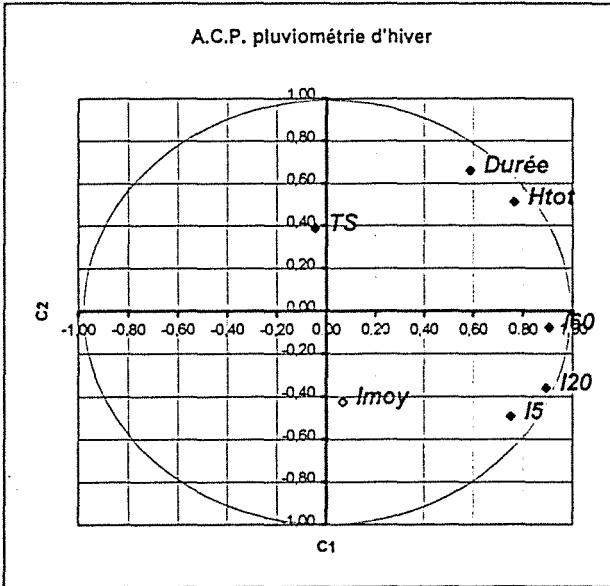
| | C1 | C2 | C3 | | C1 | C2 | C3 | | C1 | C2 | C3 | | C1 | C2 | C3 |
|-----|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|
| 169 | 1,26 | 1,49 | -1,28 | 211 | 1,25 | -0,16 | -0,58 | 253 | -0,57 | -0,09 | 0,07 | 295 | -0,35 | 1,04 | -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 | | C1 | C2 | C3 | | C1 | C2 | C3 | | 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 | | C1 | C2 | C3 | | C1 | C2 | C3 | | 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 |

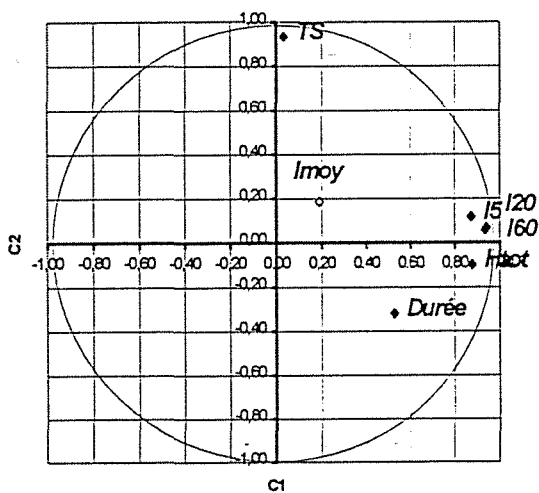
Projections des observations actives (suite)

| | C1 | C2 | C3 | | C1 | C2 | C3 | | C1 | C2 | C3 | | 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 | | | | |

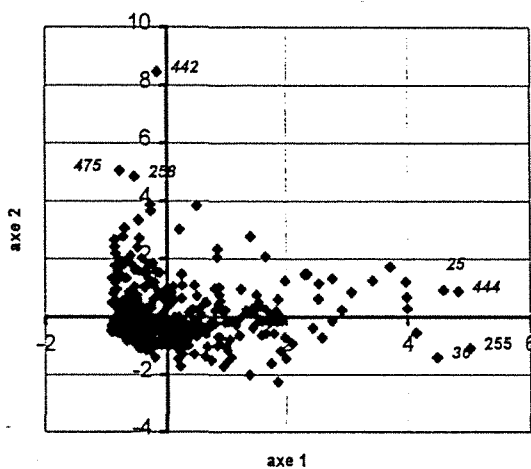
Projections des observations supplémentaires :

C1 C2 C3

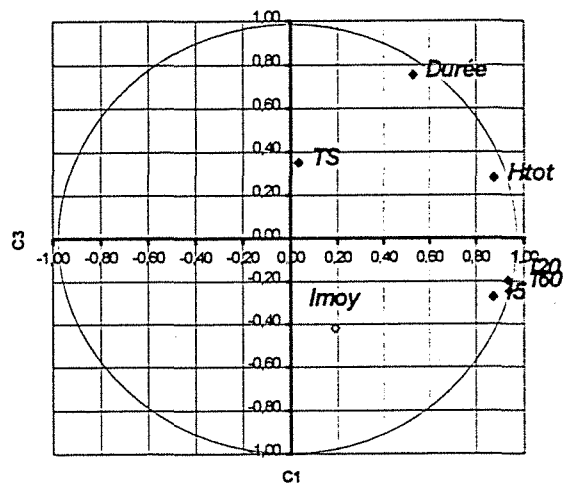
A.C.P. pluviométrie d'été



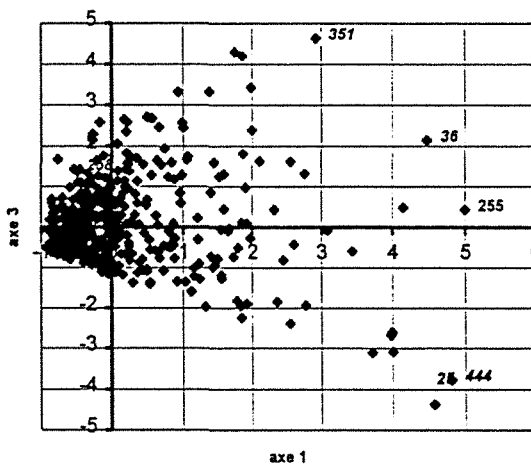
A.C.P. pluviométrie d'été



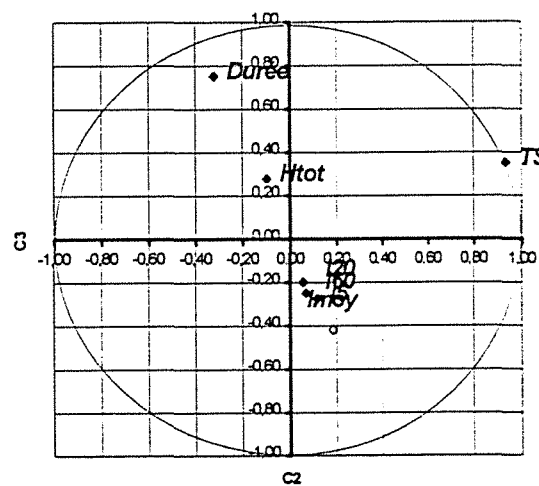
A.C.P. pluviométrie d'été



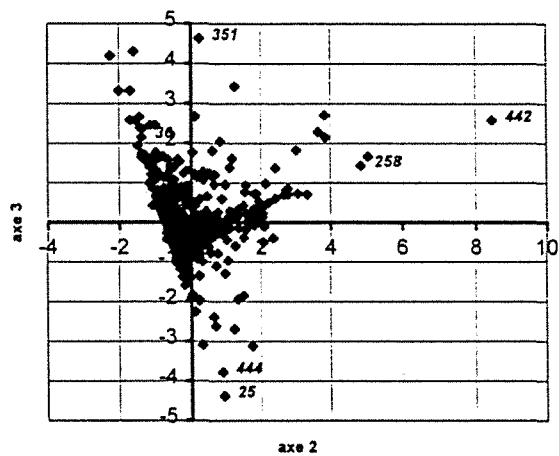
A.C.P. pluviométrie d'été



A.C.P. pluviométrie d'été

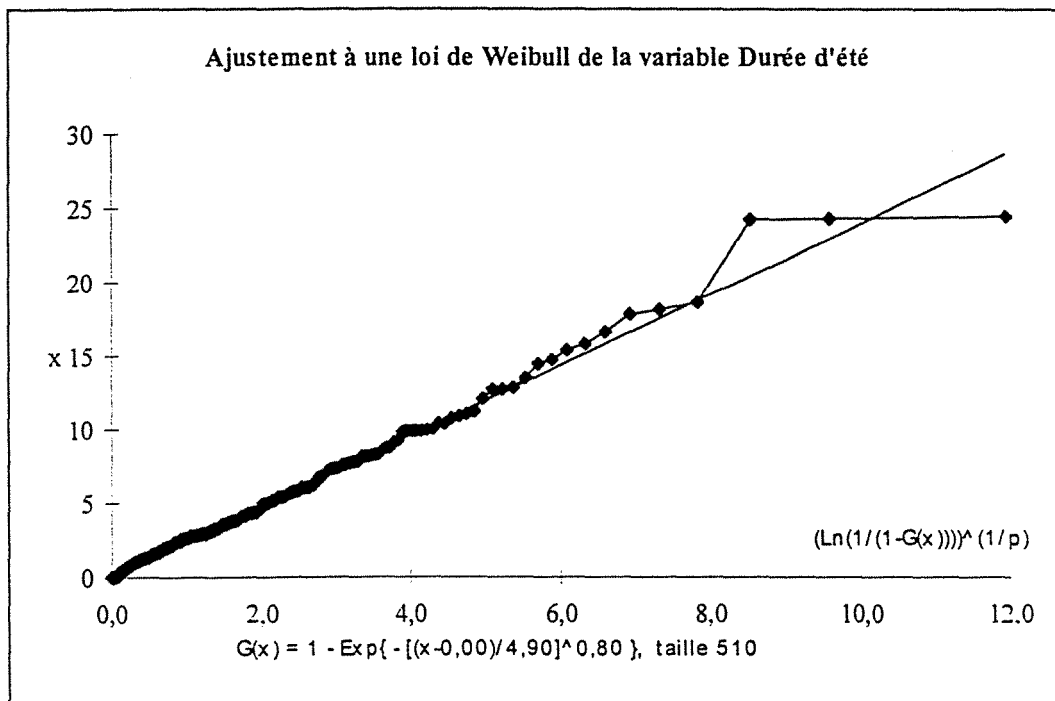
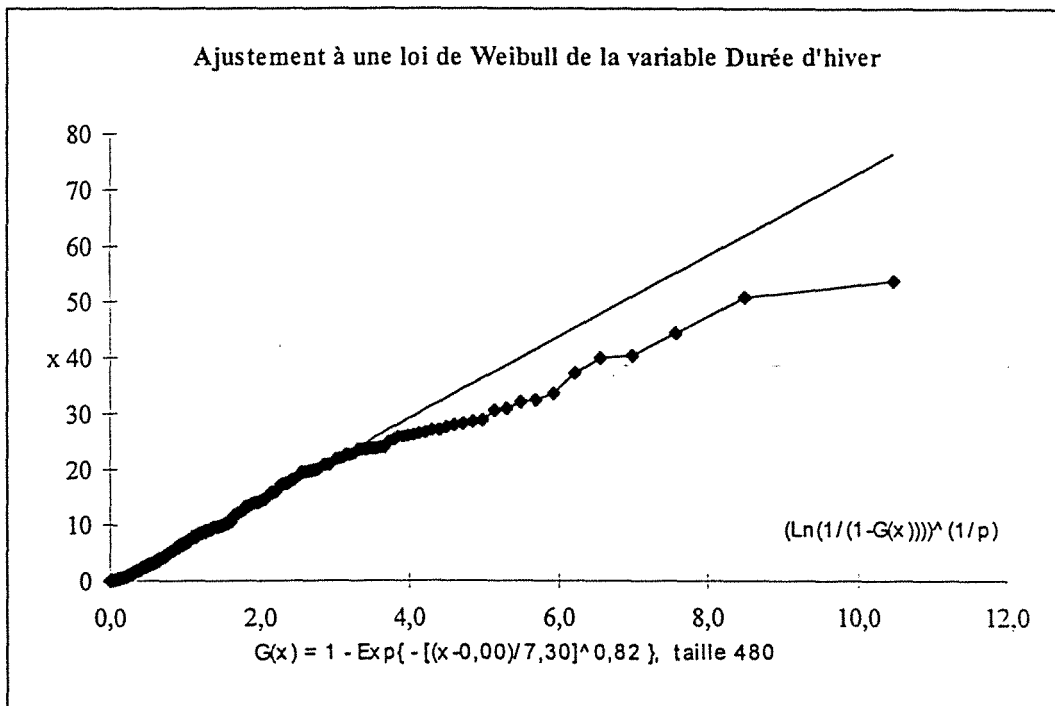


A.C.P. pluviométrie d'été

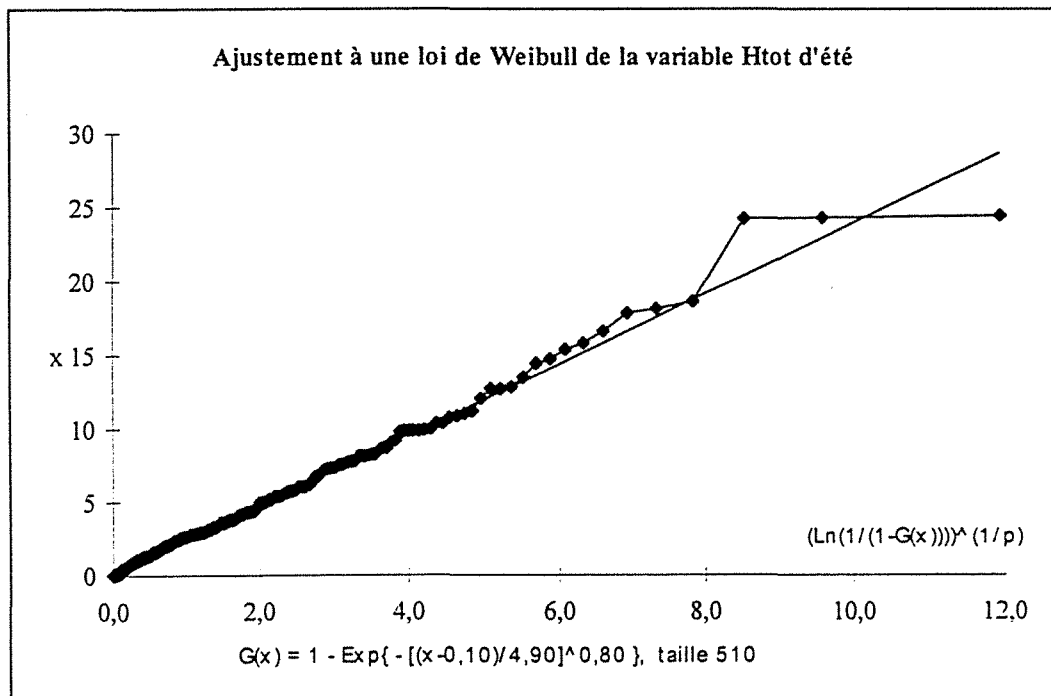
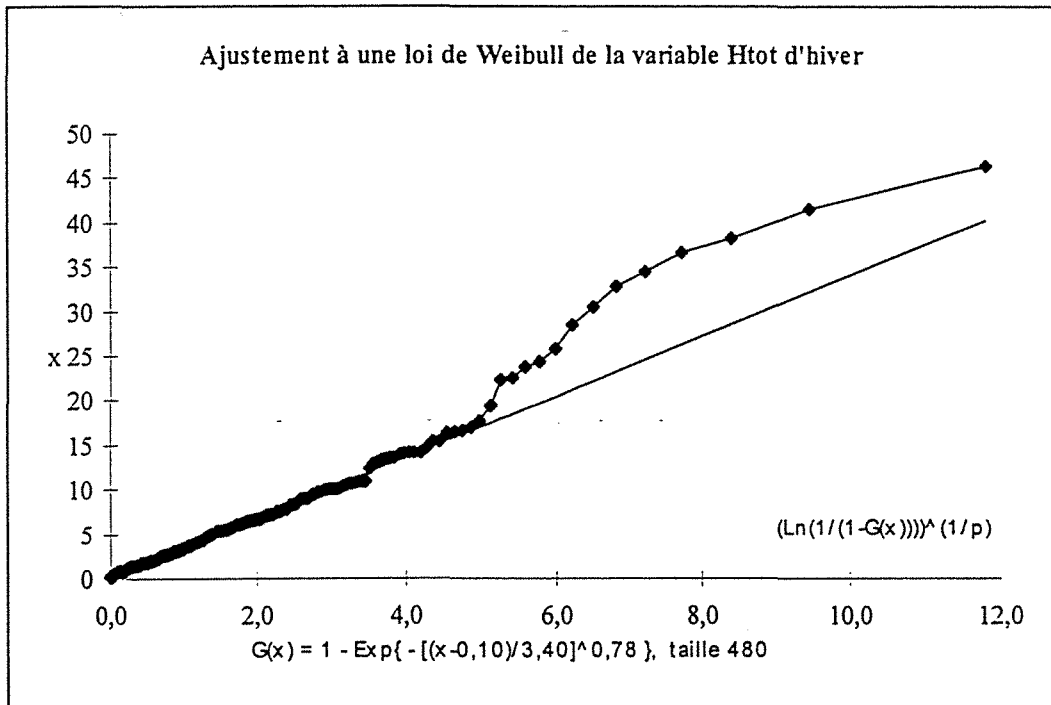


ANNEXE III.4 - Résultats graphiques des ajustements de lois sur les échantillons d'hiver et d'été des variables de pluviométrie

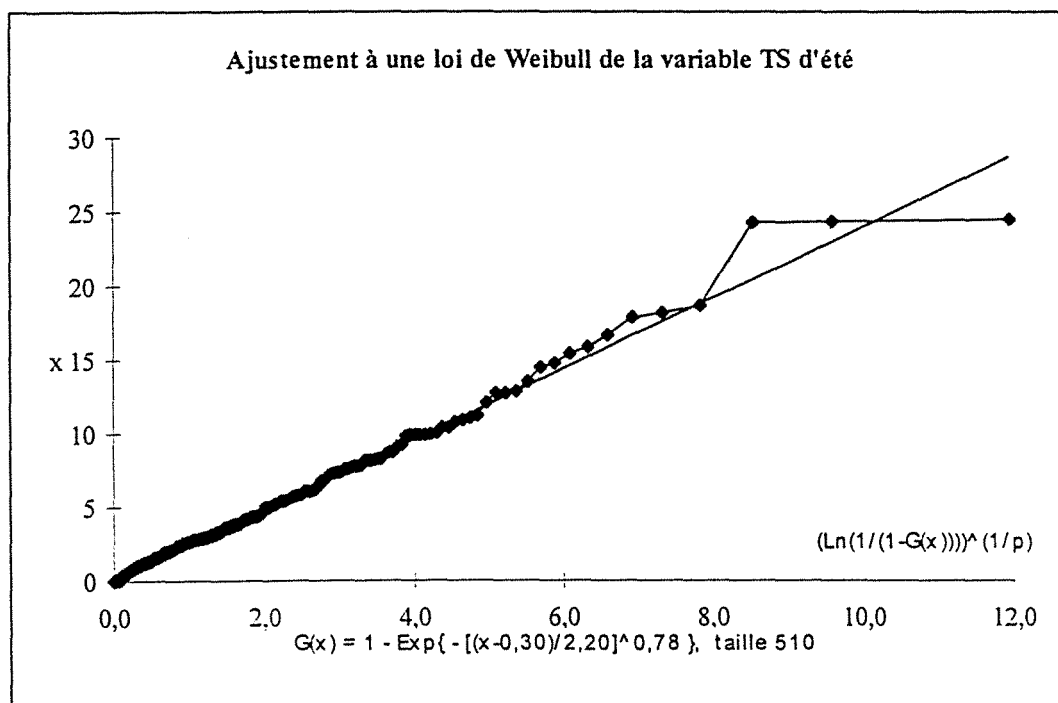
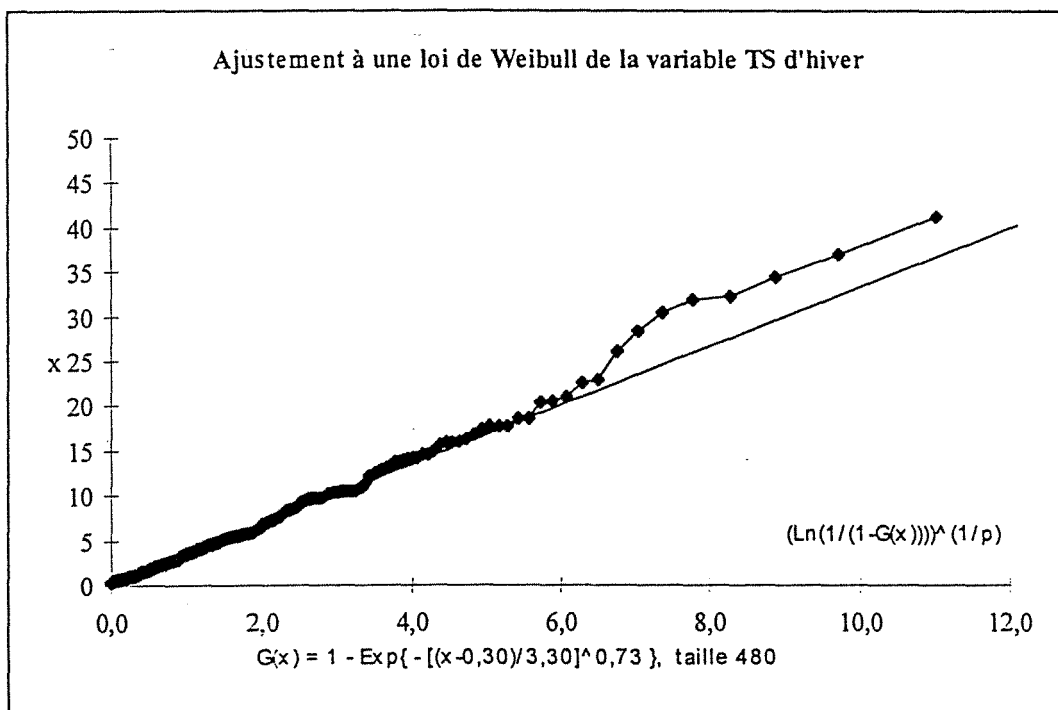
Durée événement



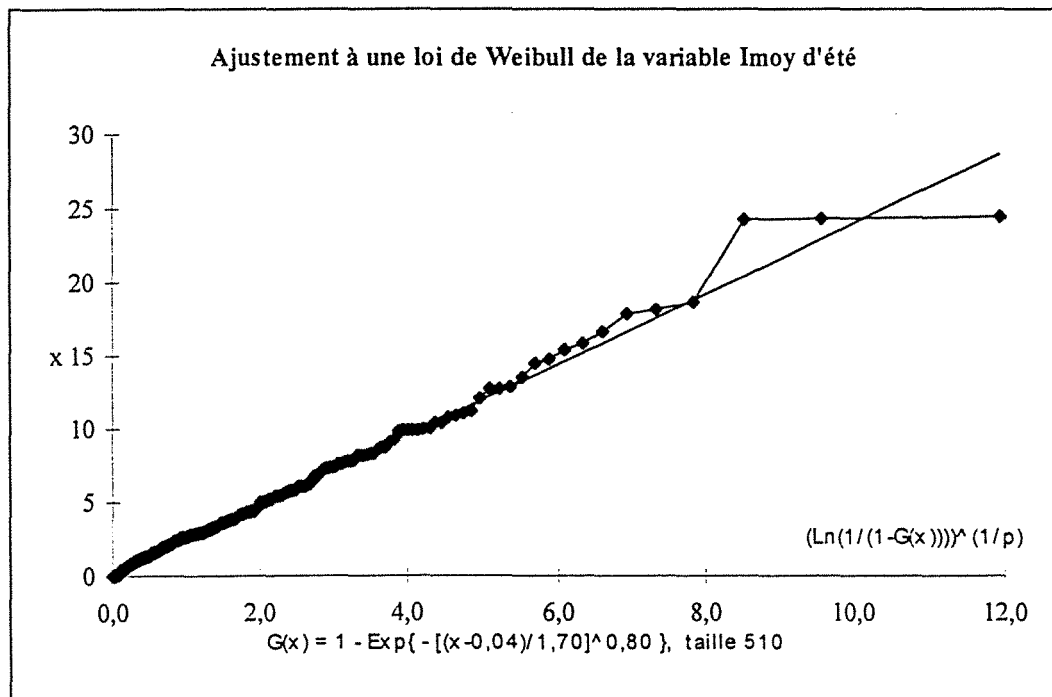
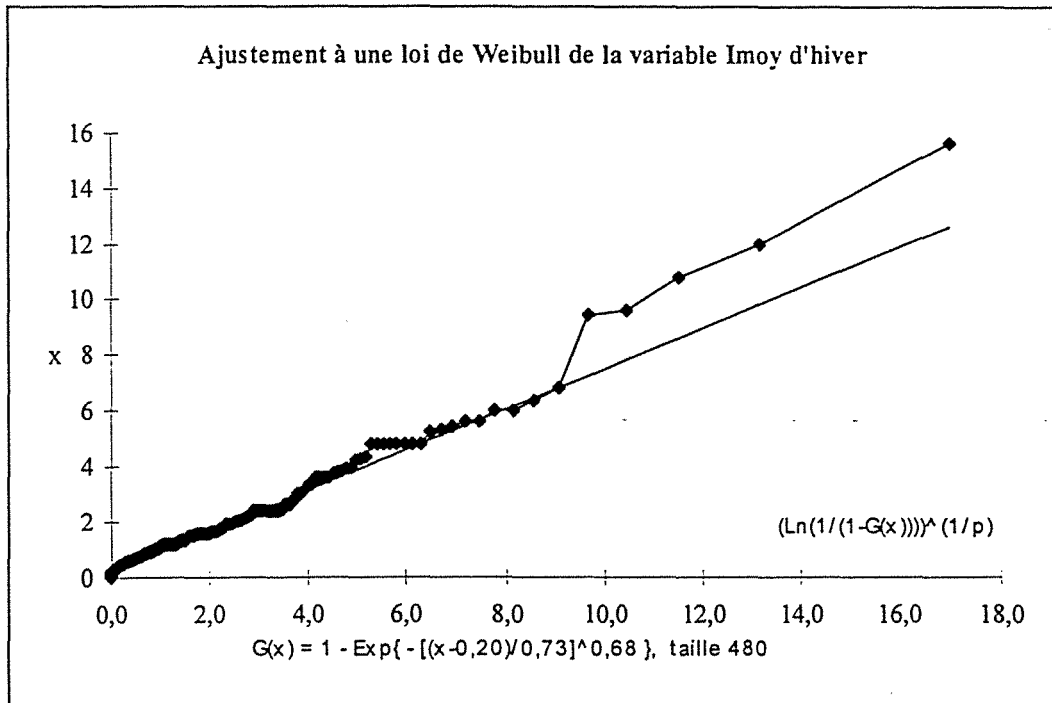
Hauteur totale



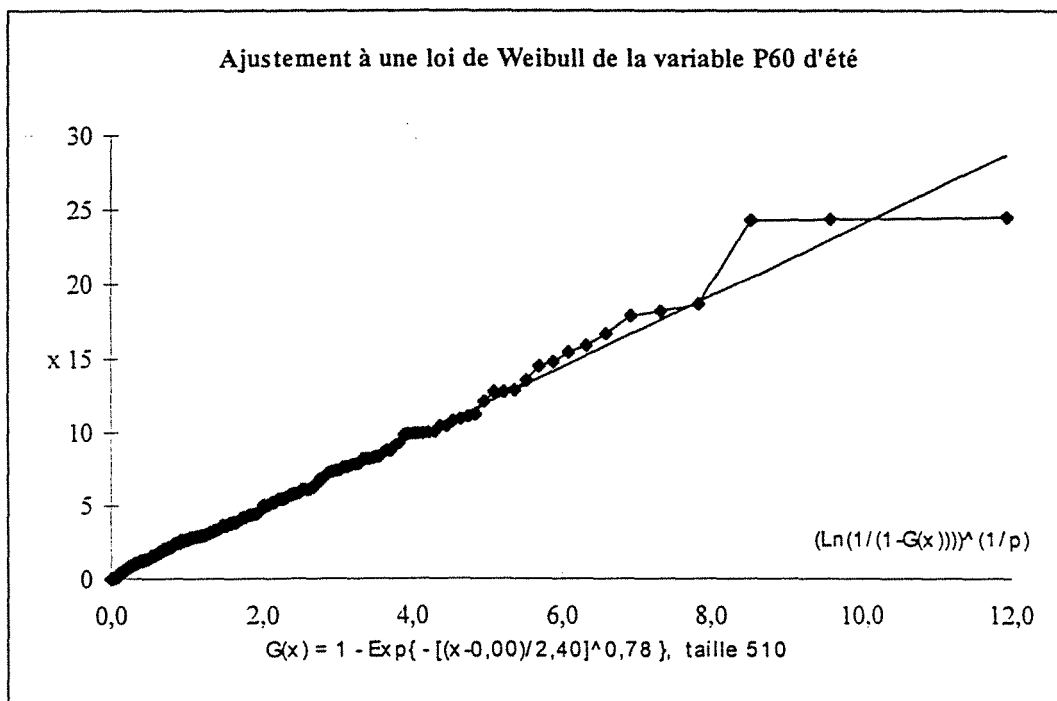
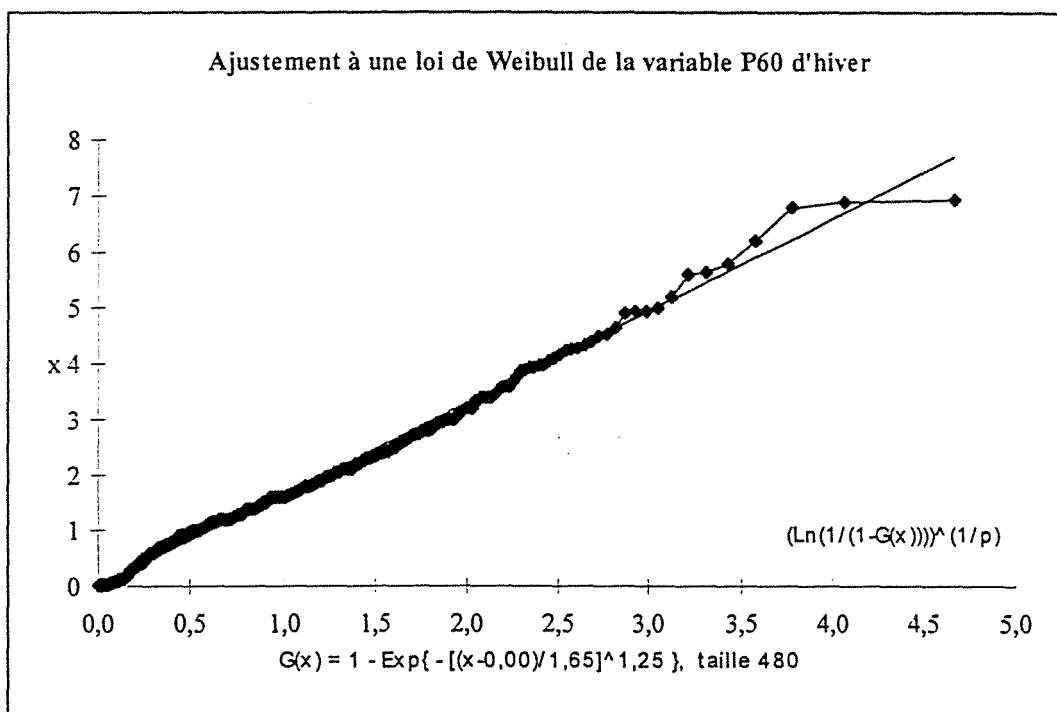
Temps sec



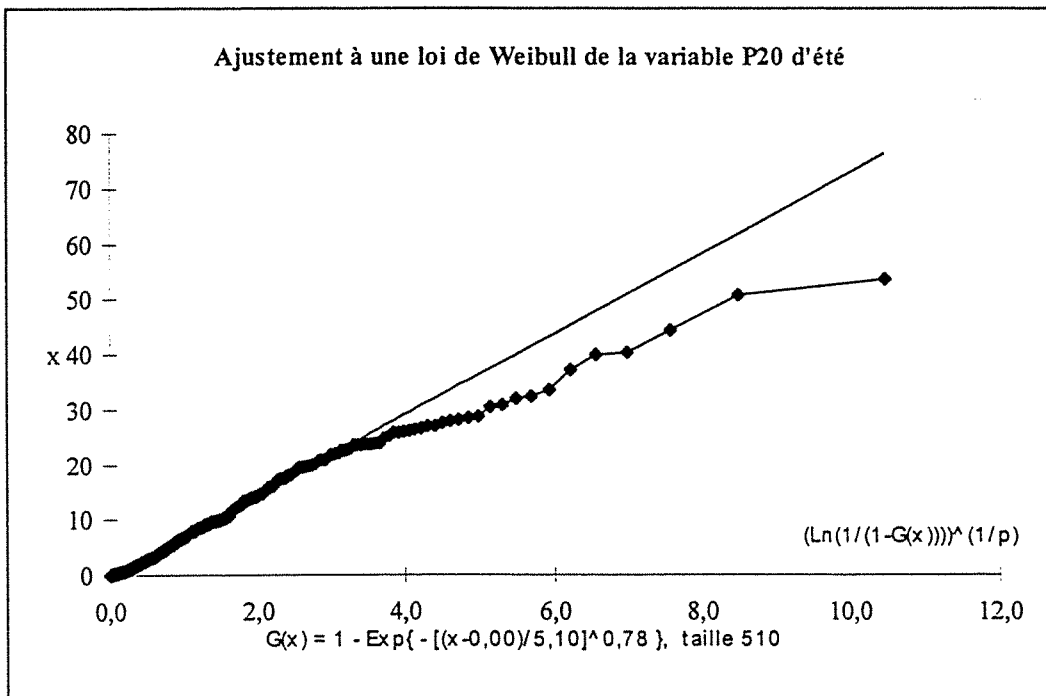
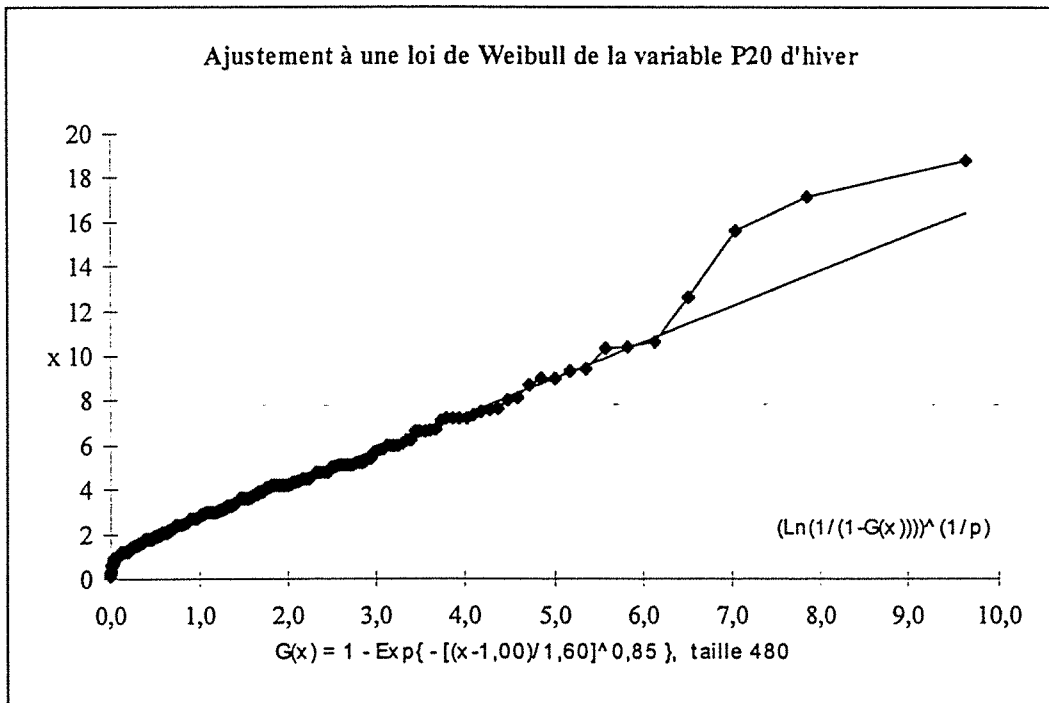
Intensité moyenne



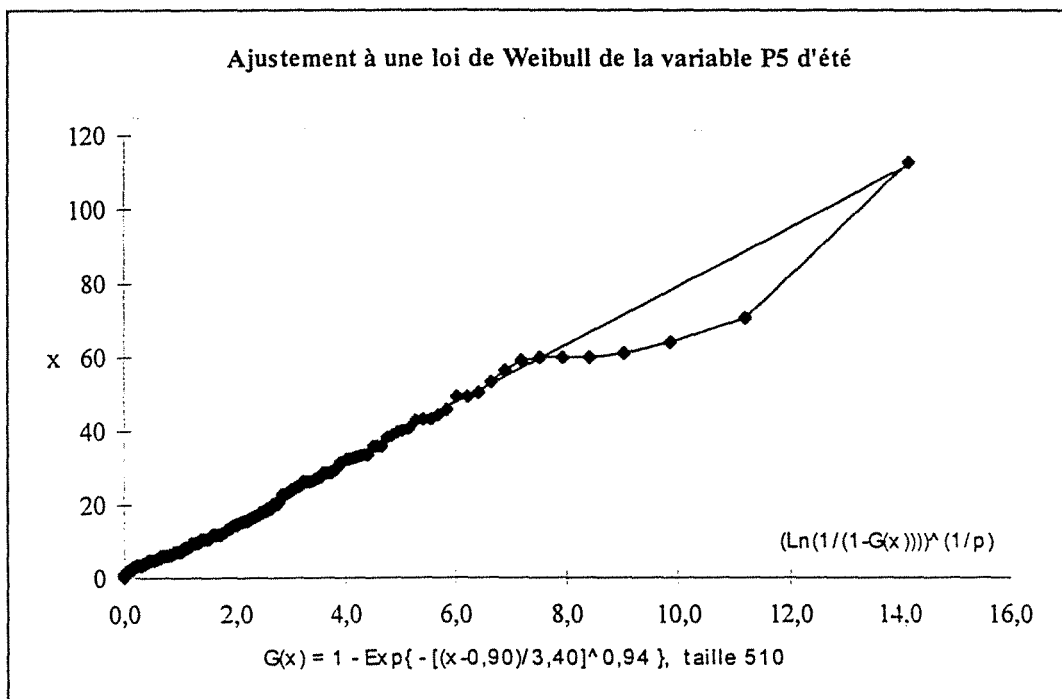
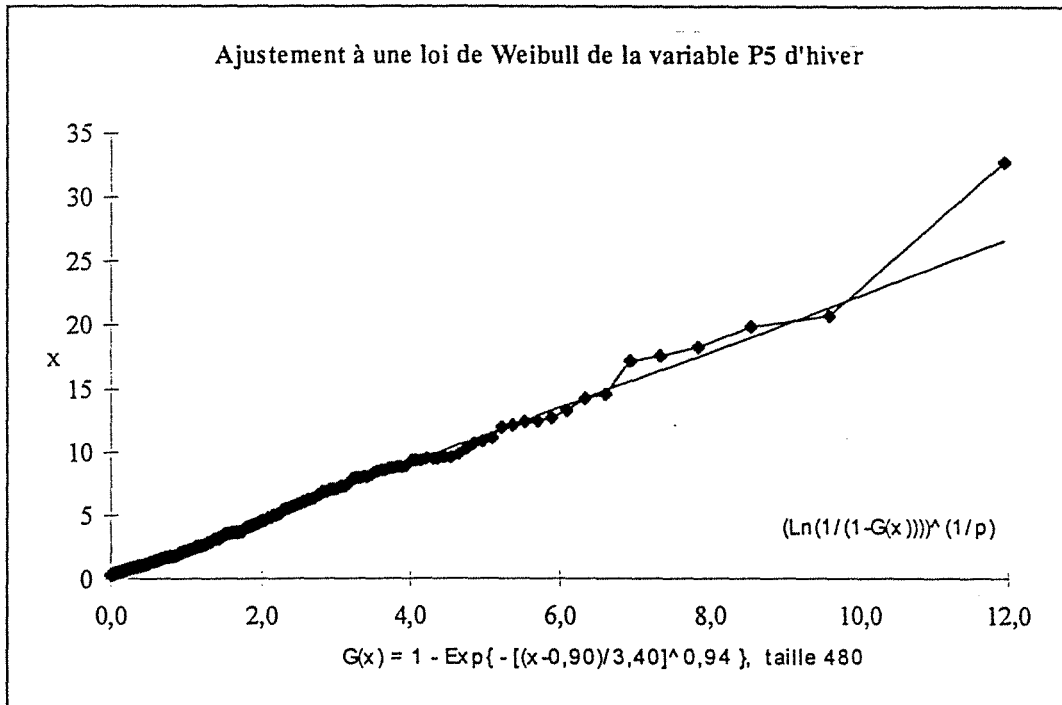
Intensité moyenne maximale sur 60 minutes



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 |

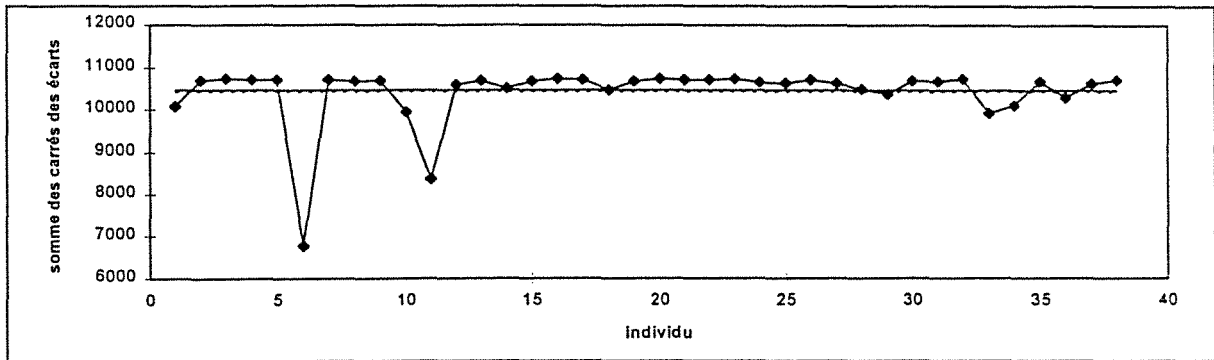


Figure V.4.1 : Variation du carré des écarts après suppression d'un individu sur l'échantillon de MESmax/h

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

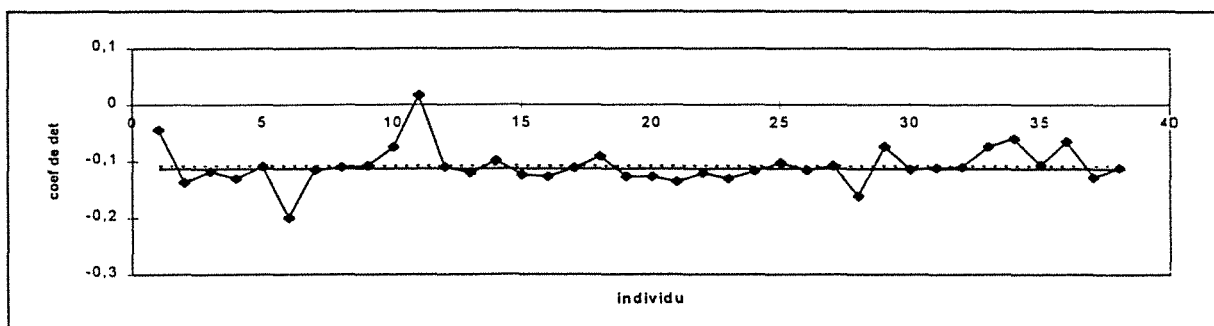


Figure V.4.3 : Variation du coefficient de détermination après suppression d'un individu sur l'échantillon de MESmax/h

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 |

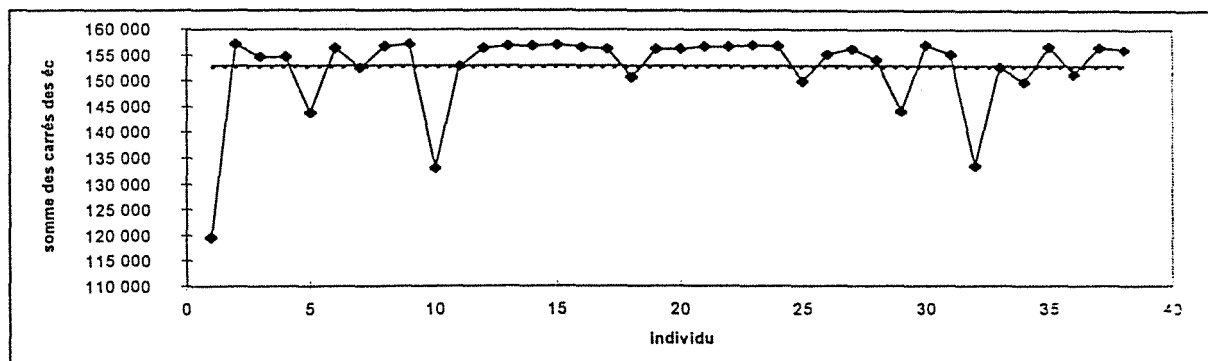


Figure V.6.1 : Variation du carré des écarts après suppression d'un individu sur l'échantillon de MESmoy

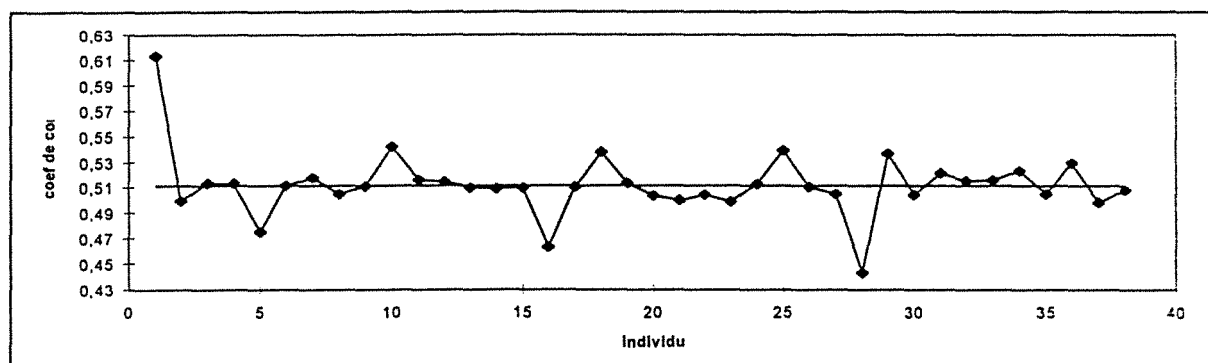


Figure V.6.2 : Variation du coefficient de corrélation après suppression d'un individu sur l'échantillon de MESmoy

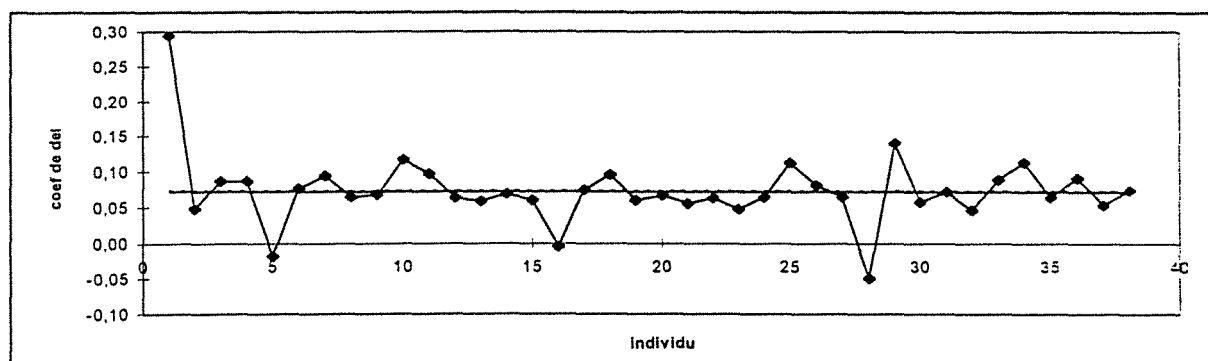


Figure V.6.3 : Variation du coefficient de détermination après suppression d'un individu sur l'échantillon de MESmoy

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 | | | | | | |
| Départ: | a3 | b3 | c3 | d3 | e3 | f3 |
| | 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= | R ² = |
| | 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 |

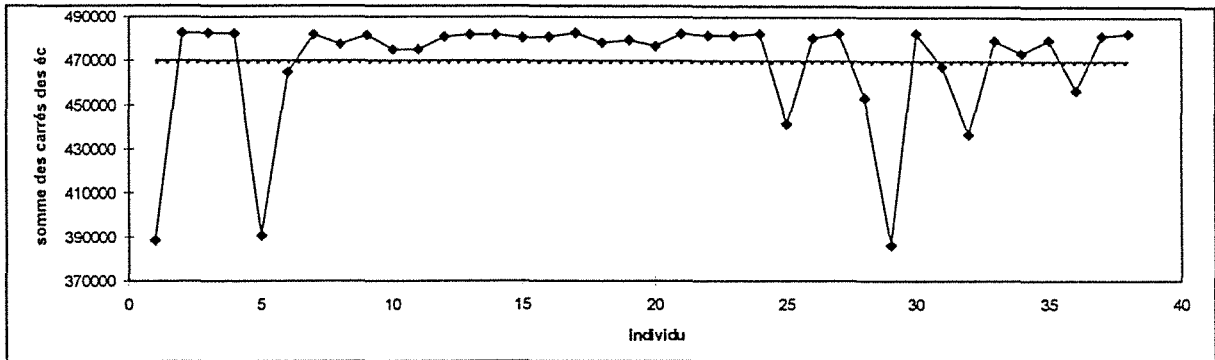


Figure V.8.1 : Variation du carré des écarts après suppression d'un individu sur l'échantillon de MESmax

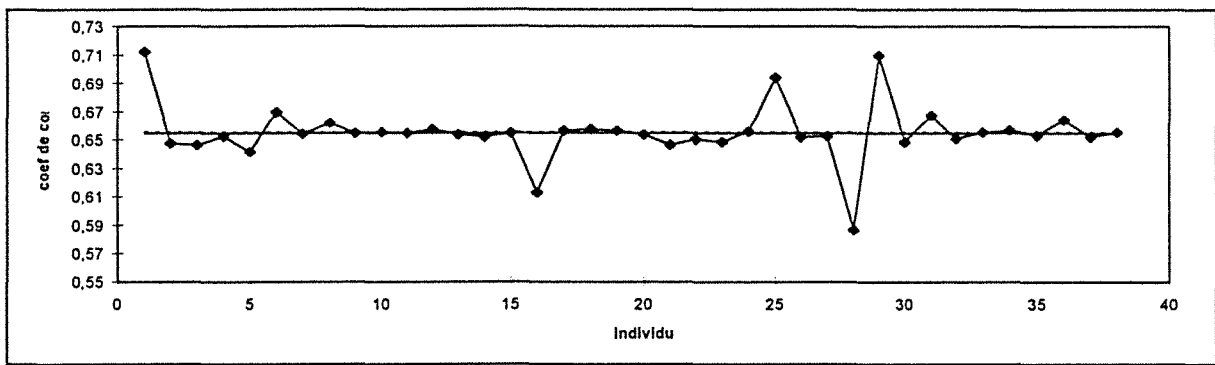


Figure V.8.2 : Variation du coefficient de corrélation après suppression d'un individu sur l'échantillon de MESmax

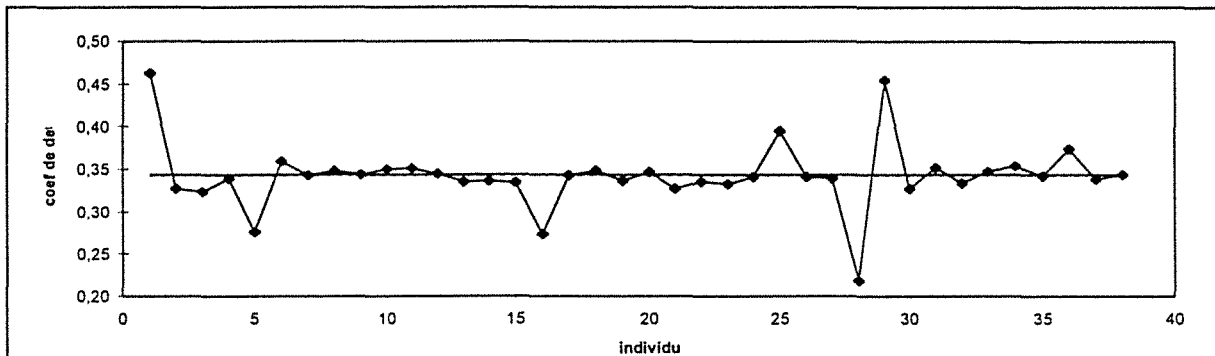


Figure V.8.3 : Variation du coefficient de détermination après suppression d'un individu sur l'échantillon de MESmax

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.

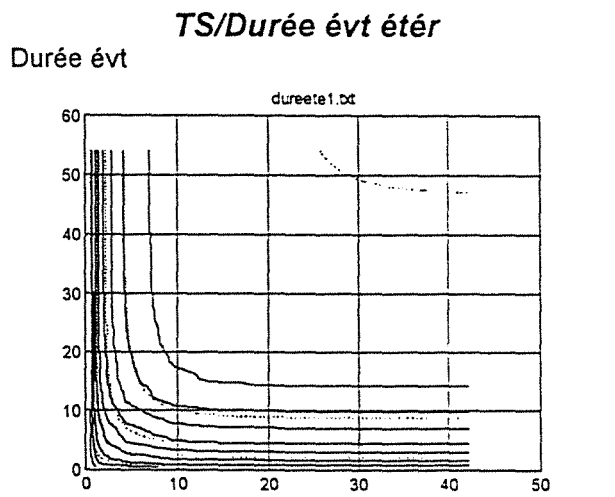
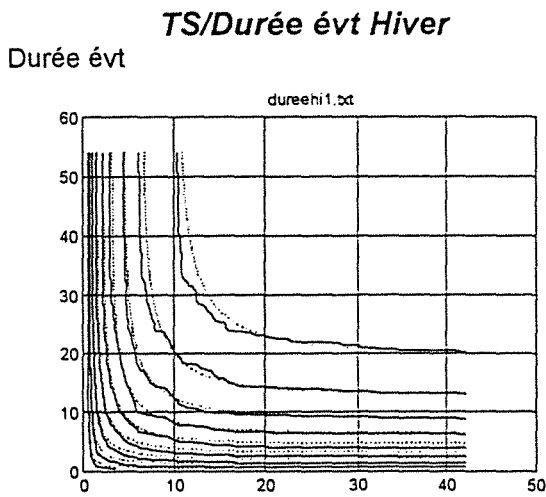
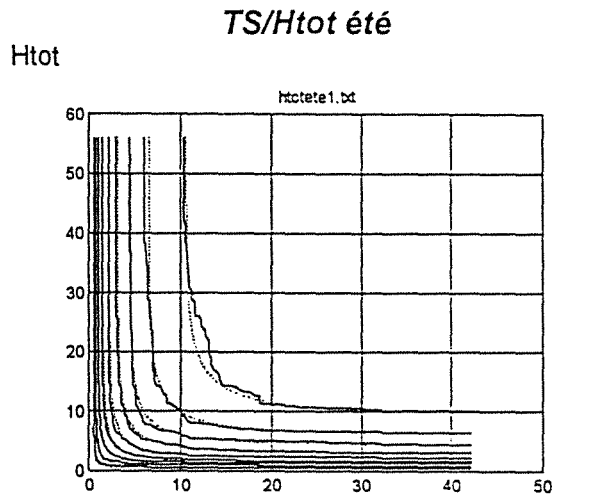
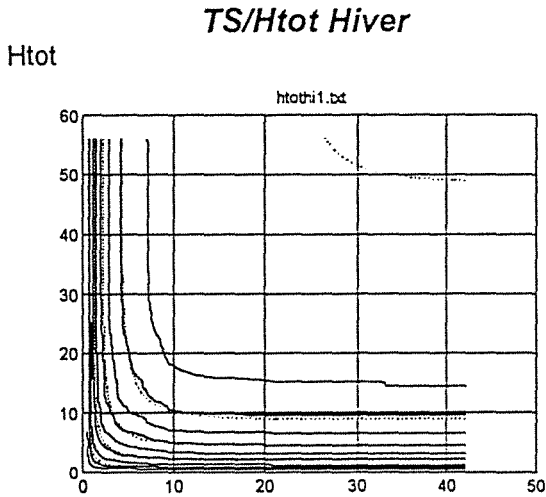
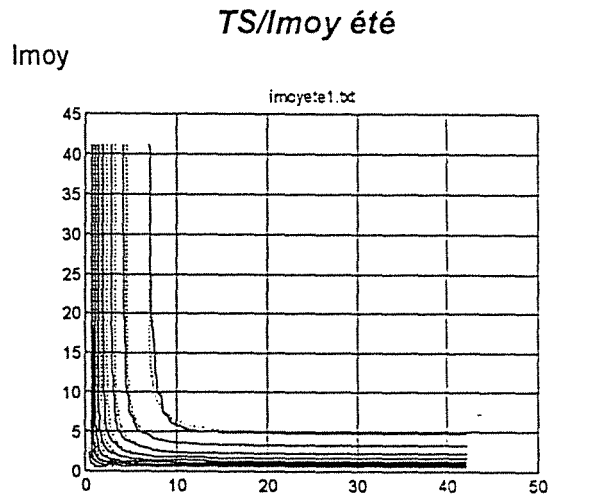
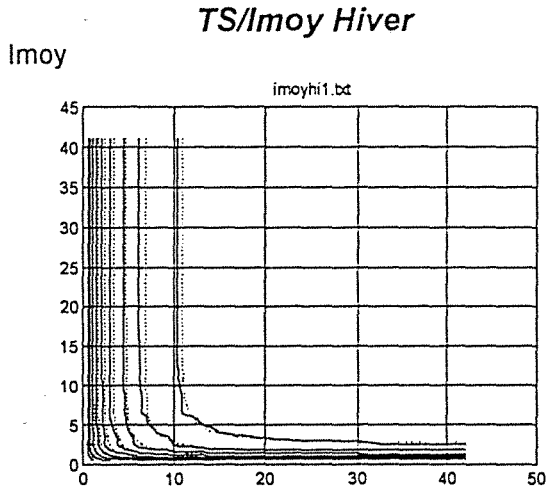
La pluviométrie déterminée, il suffit alors d'utiliser les équations des modèles globaux et des régressions déterminées au Chapitre V pour obtenir les valeurs correspondant aux variables MESTot, MESmax/h, MESmoy et MESmax.

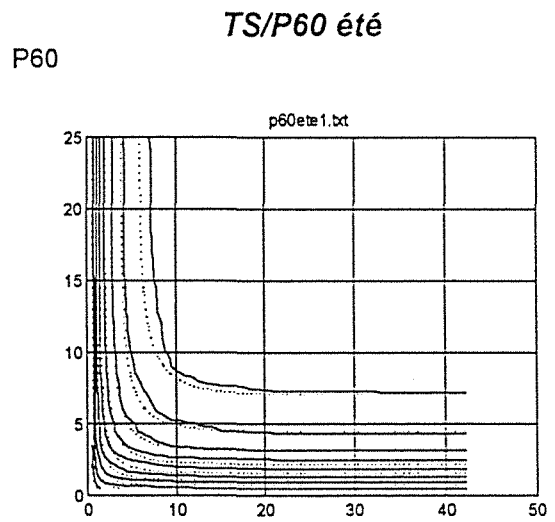
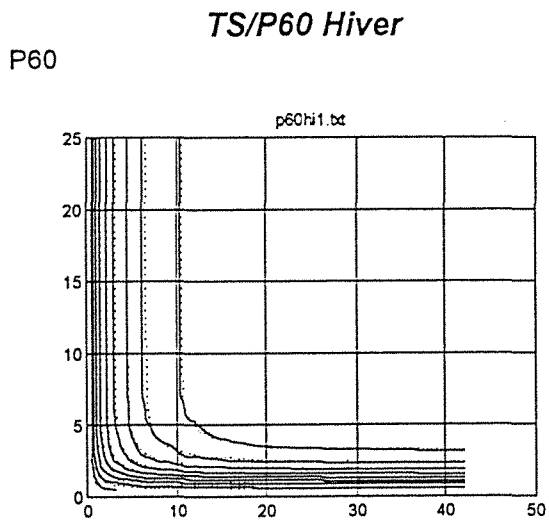
| colonnes | éléments générés | Formules utilisées |
|----------|------------------|---|
| 1 | G(TS) | =ALEA() \Rightarrow valeur $\in [0, 1[$ |
| 2 | TS | $= x_0 + g * \left(\ln \left(\frac{1}{1 - G(TS)} \right)^{1/p} \right)$ |
| 3 | G(P5) | =ALEA() \Rightarrow valeur $\in [0, 1[$ |
| 4 | P5 | $= x_0 + g * \left(\ln \left(\frac{1}{1 - G(TS)} \right)^{1/p} \right)$ |
| 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 ↗.

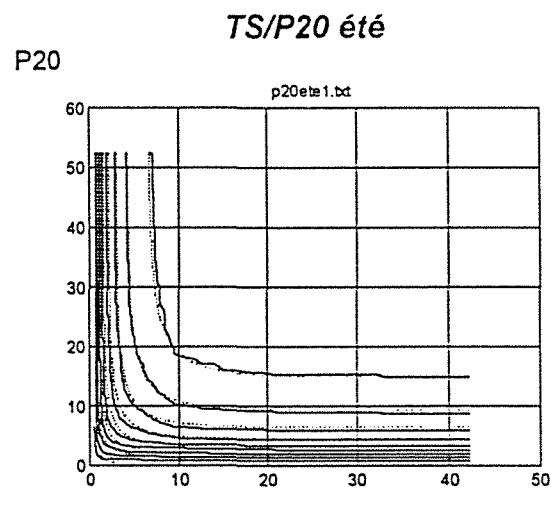
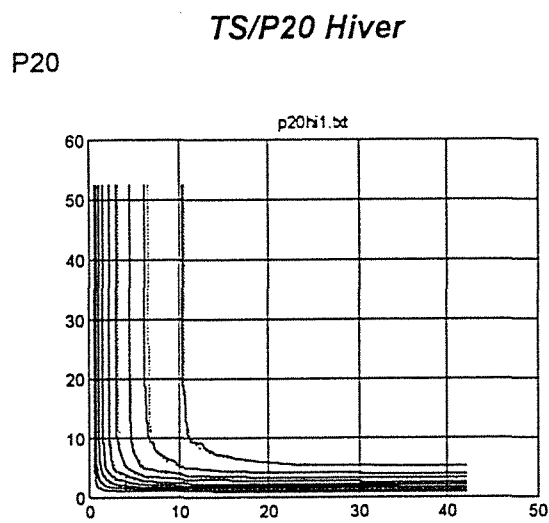
_____ courbe réelle - - - - - courbe théorique





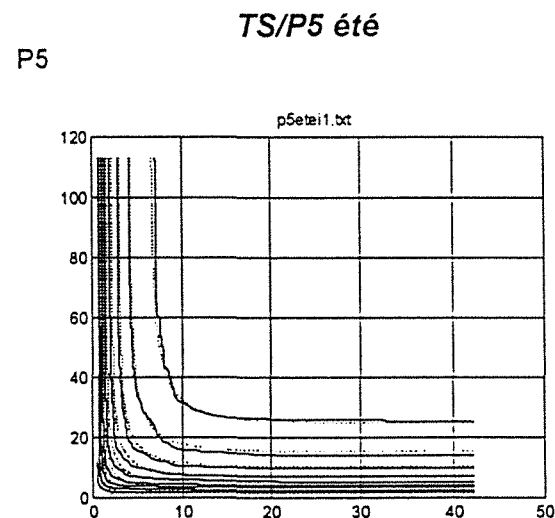
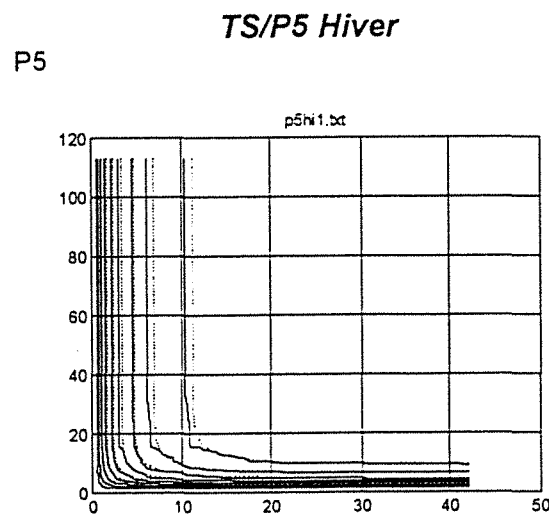
TS

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 :

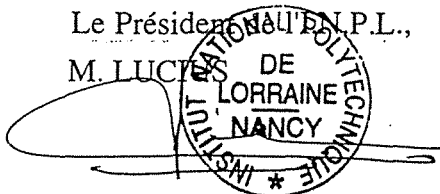
**DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE
LORRAINE**

Spécialité : **"GENIE CIVIL & MINIER"**

Fait à Vandoeuvre le, **9 Octobre 1996**

Le Président de l'INPL.,

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.