

# **HYDROLOGIE DES BASSINS VERSANTS PERI-URBAINS EQUIPES DE RESEAUX SEPARATIFS**

VARIABILITE DU COEFFICIENT D'ECOULEMENT DE ZONES PERI-URBAINES

SUBVENTION DE RECHERCHE 01 DST 12

DIVISION EAU ET ENVIRONNEMENT  
JUN 2004

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Etude du bassin de Rezé</b>	<b>8</b>
1.1	Caractéristiques du bassin versant . . . . .	8
1.2	Acquisition des grandeurs hydrologiques . . . . .	9
1.2.1	Pluviométrie . . . . .	9
1.2.2	Débitmétrie . . . . .	10
1.2.3	Données météorologiques . . . . .	10
1.3	Sélection des évènements pluvieux . . . . .	11
1.3.1	Caractérisation des évènements pluvieux . . . . .	11
1.3.2	Résultats de la sélection et critiques . . . . .	12
1.4	Analyse statistique des évènements pluvieux . . . . .	13
1.4.1	Analyse des paramètres relatifs aux précipitations . . . . .	13
1.4.2	Analyse des restitutions - Coefficient d'écoulement . . . . .	15
1.4.3	Analyse des évènements à restitution négligeable . . . . .	17
1.4.4	Analyse sommaire du ruissellement du bassin . . . . .	17
<b>2</b>	<b>Modélisation des écoulements</b>	<b>21</b>
2.1	Le modèle de régression linéaire multiple . . . . .	21
2.1.1	Principe de calcul . . . . .	21
2.1.2	Résultats préliminaires . . . . .	22
2.1.3	Modèle linéaire composé . . . . .	24
2.1.4	Robustesse du modèle . . . . .	26
2.2	Le modèle de classification par partition . . . . .	27
2.2.1	Principe . . . . .	27
2.2.2	Calcul préliminaire . . . . .	27
2.2.3	Ajustement des paramètres . . . . .	28
2.3	Le modèle de classification par similitudes . . . . .	29
2.3.1	Principe de classification . . . . .	29
2.3.2	Reconstruction des données . . . . .	30
2.3.3	Calculs . . . . .	31

---

---

2.3.4	Résultats . . . . .	31
<b>3</b>	<b>Comparaison des comportements</b>	<b>33</b>
3.1	Caractéristiques des éléments hydrologiques . . . . .	33
3.1.1	Le bassin des Gohards . . . . .	33
3.1.2	Les surfaces du LCPC . . . . .	34
3.2	Sélection des évènements pluvieux . . . . .	35
3.2.1	Caractéristiques des pluies . . . . .	35
3.2.2	Comportement des bassins . . . . .	35
3.2.3	Caractérisations des pertes initiales . . . . .	37
3.3	Comparaison des réponses hydrologiques . . . . .	38
3.3.1	Comparaison à l'aide du modèle de régression linéaire multiple . . . . .	38
3.3.2	Comparaison à l'aide des méthodes de classification . . . . .	41
3.4	Relation entre les bassins et leurs éléments structuraux . . . . .	43
<b>A</b>	<b>Evaporation, Transpiration . . .</b>	<b>47</b>
A.1	Définitions . . . . .	47
A.2	Bilan calorifique au niveau de la surface évaporante . . . . .	48
A.3	Formule de Penman . . . . .	49
<b>B</b>	<b>Selection des événements pluvieux . . .</b>	<b>51</b>

---

# Table des figures

1.1	Variabilité des évènements pluvieux. . . . .	12
1.2	Caractéristiques des évènements pluvieux. . . . .	14
1.3	Corrélation des coefficients d'écoulements des bassins de Rezé. . . . .	15
1.4	Répartition des valeurs de coefficient d'écoulement des bassins de Rezé. . . . .	16
1.5	Variabilité chronologique des coefficients d'écoulements des évènements pluvieux du bassin de Rezé. . . . .	18
1.6	Ajustement du modèle des pertes initiales et du coefficient de ruissellement constant. . . . .	19
1.7	Comparaison des CE observés et reconstitués sur le bassin de Rezé. . . . .	20
1.8	Répartition chronologique des résidus entre CE reconstitués et observés. . . . .	20
2.1	Résultats de simulation avec le modèle linéaire multiple. . . . .	23
2.2	Valeurs des résidus de simulation des coefficients d'écoulements. . . . .	23
2.3	Résultats des reconstitutions du coefficient d'écoulement à partir du modèle linéaire composés. . . . .	25
2.4	Evaluation de la capacité prédictive du modèle linéaire. Comparaison des résultats données pour les données de calage et les données prédites. . . . .	26
2.5	Correlation entre les valeurs simulées et observées selon le modèle de partitionnement. . . . .	28
2.6	Dendrogramme ou arbre de classification. . . . .	29
2.7	Constitution des groupes de référence. . . . .	30
2.8	Reconstitution des coefficients d'écoulement par la méthode de classification hiérarchique. . . . .	31
2.9	Reconstitution des coefficients d'écoulement par la méthode de classification hiérarchique. Reconstitution par moyenne des trois éléments de références les plus proches. . . . .	32
3.1	Distribution des caractéristiques des épisodes . . . . .	36
3.2	Coefficients d'écoulement des différents éléments hydrologiques . . . . .	37
3.3	Transposition du modèle linéaire du bassin de Rezé . . . . .	39

---

---

3.4	Comparaison des comportements des familles définie à priori . . . . .	41
3.5	Comportements des groupes d'évènements similaires . . . . .	42
3.6	Coefficients d'écoulement théorique des bassins urbains de Rezé et des Go- hards reconstitués à partir des contributions des surfaces individuelles. . . .	45

---

# Liste des tableaux

1.1	Caractéristiques des dispositifs de mesure des débits. . . . .	10
2.1	Matrice des coefficients de corrélations linéaires des variables, classés dans l'ordre décroissant de signification . . . . .	22
2.2	Exemple de partitionnement de domaine de définition de variables. . . . .	27
3.1	Résultats du modèle des pertes initiales simples et coefficient de ruissellement constant . . . . .	37
3.2	Résultats de la transposition du modèle linéaire du bassin de Rezé . . . . .	39
3.3	Sélection des variables et significativité sur les différentes unités hydrologiques	40
3.4	Occupation du sol des bassins de Rezé et des Gohards . . . . .	44

---

# Introduction

L'étude des hydrosystèmes urbains à jusqu'à présent donné la priorité aux pluies intenses afin de répondre aux demandes exprimées par les collectivités concernant le dimensionnement des ouvrages d'évacuation des eaux pluviales. Une seconde préoccupation de nature qualitative, conciliant enjeux économiques et environnementaux, s'ajoute aujourd'hui : le traitement des eaux pluviales. Cette nouvelle préoccupation nécessite d'étudier et d'expliquer la réponse des bassins versants urbains lors des événements pluvieux courants.

La connaissance du fonctionnement hydrologiques des bassins versants urbains reste encore très perfectible. Des études résument la réponse d'un bassin versant urbain à un événement pluvieux par son coefficient d'écoulement défini comme le rapport entre le volume d'eau écoule et le volume précipité durant cet événement. Elles mettent en évidence les variations significatives de ce coefficient d'une pluie à l'autre.

Ces variations du coefficient d'écoulement ne sont pas correctement reproduites par les fonctions de production classiques et restent à expliquer. Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées mène un suivi expérimental de longue durée sur des bassins versants urbains de l'agglomération nantaise. Sur le bassin de Rezé des travaux de modélisation ont été menés, détaillant de l'influence du sol et du proche sous sol sur la formation des débits ; les hétérogénéités de la surface du sol et du proche sous-sol ont été modélisées alors que les mécanismes de surface (interception, infiltration, évaporation et ruissellement) ont été simplement paramétrés. Ces travaux ont montré que la contribution directe des surfaces naturelles au débit par ruissellement de surface se produit assez rarement. Les surfaces naturelles contribuent cependant de façon significative à la formation du débits par le drainage du sol qu'assurent les nombreux réseaux souterrains. Enfin il apparaît que la variabilité des coefficients d'écoulement du bassin versant pour les pluies courantes est à rechercher dans le comportement des surfaces revêtues.

L'étude présentée ici s'inscrit dans le prolongement des travaux cités ci-dessus. L'analyse statistique des données, recueillies sur les différents différents hydrosystèmes urbains suivis par le LCPC, est conduite avec un double objectif :

1. Mettre en place des outils statistiques qui permettent de schématiser le comportement hydrologique d'un système et d'en donner les variables descriptives majeures. Les données des 10 années de suivi du bassin de Rezé constituent un échantillon suffisamment conséquent pour définir et tester des méthodes de synthèse robustes.
2. Mener des comparaisons, à partir de ces outils statistiques, entre différents systèmes hydrologiques afin de mettre en évidence leurs similitudes de comportement hydrologique et ainsi de confirmer ou infirmer les hypothèses avancées quant à l'origine de la variabilité du comportement hydrologique des hydrosystèmes urbains.

# Chapitre 1

## Etude du bassin de Rezé

### 1.1 Caractéristiques du bassin versant

Le bassin versant de Rezé est situé dans l'agglomération nantaise. Il subit des précipitations caractéristiques d'un climat océanique, c'est à dire fréquentes et peu intenses. La pluie moyenne annuelle calculée sur les années 1950 à 1990 avoisine  $791\text{mm}$ . La topographie du site est douce, avec une pente moyenne de  $2,3\%$  et un dénivelé maximal de  $11,5\text{m}$ . Le sol est un limon argileux contenant des passées limoneuses de gravillons roulés. Le socle géologique, constitué de roches éruptives, est situé à quelques mètres. Le niveau de la surface libre est peu profond, entre 2 mètres et la surface et que les écoulements souterrains se font principalement de l'est vers l'ouest.

Des essais in-situ de perméabilité entrepris sur des piezomètres ont permis d'évaluer à  $5.10^{-7}\text{m/s}$  la conductivité hydraulique à saturation du sol entre 2,5 et 4,5 mètres de profondeur.

Le site est équipé d'un réseau d'assainissement de type séparatif délimitant deux bassins versants d'eaux pluviales :

- le petit bassin versant (P5), d'une superficie de  $4,7\text{ha}$ , il possède un réseau d'une longueur de  $480\text{m}$  situé principalement sous le corps de la chaussée à une profondeur variant entre  $1,5$  et  $1,2\text{m}$  ;
- le grand bassin versant (P13), d'une superficie de  $13,4\text{ha}$ , il possède un réseau d'une longueur de  $1710\text{m}$  à une profondeur variant entre 1 et 3 mètres.

Ces deux bassins ont un exutoire au même endroit. L'habitat sur ces bassins versants est principalement de type pavillonnaire, avec une petite partie de type collectif (un quart du grand bassin). Le bâti est relativement peu dense et toujours entouré d'espaces verts : la surface moyenne bâtie par parcelle est de  $98\text{m}^2$ , pour une surface moyenne de parcelle de  $665\text{m}^2$ . Quatre types de surface sont distinguées pour caractériser l'imperméabilisation du bassin :

- les surfaces imperméabilisées raccordées au réseau,
-



- les surfaces perméables raccordées au réseau,
- les surfaces imperméables non raccordées au réseau,
- les surfaces perméables non raccordées au réseau.

Le coefficient d'imperméabilisation de chaque bassin (*Cimp*), défini comme le rapport entre la surface imperméabilisée raccordée au réseau et la surface totale, vaut 0,37 pour le petit bassin et 0,39 pour le grand bassin.

## 1.2 Acquisition des grandeurs hydrologiques

Le site de Rezé est suivi depuis 1990 avec un double objectif :

1. réaliser l'acquisition de données sur une longue période, ce qui est nécessaire pour pouvoir tirer des conclusions robustes et représentatives du comportement hydrologique des bassins versants ;
2. réaliser l'acquisition en continu et donc inclure les périodes «sèches» séparant les évènements pluvieux, objectif original car les études portent généralement sur les évènements pluvieux indépendamment des périodes les séparant.

L'acquisition des données est réalisée par des capteurs pilotés par des centrales d'acquisition. Les données stockées dans ces centrales sont récupérées lors de relevés bimensuels sur le terrain. Elles sont ensuite transférées sur le réseau informatique du LCPC où elles sont soumises à une procédure de validation qui comprend la critique et la correction éventuelle des résultats. Le pas de temps d'acquisition est en général la minute. Lorsqu'il s'agit de réaliser des études, les données peuvent être reconstituées à des pas de temps plus long à l'aide de logiciel d'exploitation de données<sup>1</sup>.

### 1.2.1 Pluviométrie

Les précipitations sont mesurées par trois pluviomètres à augets basculants. Au pied de chacun des pluviomètres, l'eau traversant le capteur est recueillie dans un récipient et mesurée à chaque relevé de terrain (mesure utile pour la validation ultérieure du fonctionnement des pluviomètres).

Les pluviomètres sont des capteurs relativement bien maîtrisés, la mesure reste toutefois sujette à des erreurs. L'intensité des précipitations sur les bassins versants est calculée en prenant la moyenne des intensités mesurées par les trois pluviomètres. Les données sont acquises ici au pas de temps de la minute. A ce pas de temps la sensibilité des intensités mesurées est de  $12\text{mm/h}$  (soit 1 basculement à la minute).

---

<sup>1</sup>Logiciel et données sont à la disposition de la communauté scientifique sur le serveur du LCPC, <ftp://ftp.lcpc.fr/incoming/reze>

TAB. 1.1 – Caractéristiques des dispositifs de mesure des débits.

Caractéristique des seuils	Bassin P5	Bassin P13
Largeur (cm)	42	70
Hauteur de pelle (cm)	12	24
Mesure de hauteur d'eau	Sonde US immergée & capteur de pression	
gamme de débit couverte (L/s)	1–31	14–335

### 1.2.2 Débitmétrie

La détermination des débits est faite à partir de la mesure de la hauteur d'eau en amont d'un seuil jaugeur. Les deux seuils jaugeurs sont installés dans des canaux en maçonnerie et ont été choisis en tenant compte des débits maximaux pour une période de retour de 5 ans. Les mesures de hauteur d'eau, à l'amont des seuils, sont réalisées à l'aide de sondes à ultrasons (US) et de capteurs de pression. Ces mesures sont doublées à chaque exutoire lorsque c'est possible.

La débitmétrie est sujette à d'importantes imprécisions, liées au fait que la grandeur elle-même (un volume d'eau par unité de temps) n'est pas directement mesurable. Ces imprécisions affectent la mesure de la hauteur d'eau et ainsi le débit, puisque ce dernier est déterminé à partir des lois hauteur-débits données ci-après :

- Bassin P5 :  $Q = 1,4 \cdot 10^{-3} \times H^{1,67}$   $q$  en L/s et  $H$  en mm
- Bassin P13 :  $Q = 1,9 \cdot 10^{-3} \times H^{1,66}$

Les caractéristiques des dispositifs de mesures des débits ainsi que leurs domaines de mesures théoriques sont définies dans le tableau 1.1.

### 1.2.3 Données météorologiques

Les données météorologiques sont utilisées pour prendre en compte l'influence de l'atmosphère ambiante. La proximité de la station météorologique de l'aéroport de Nantes-Atlantique (5km) permet l'accès à ces données. Les données disponibles renseignent l'évapotranspiration, la température de l'air et du sol, l'insolation, le vent, la pression atmosphérique, l'humidité relative et la tension de vapeur de l'air. Les données d'évapotranspiration, en moyenne journalière, correspondent à l'évapotranspiration potentielle calculée selon la formule de Penman (Annexe A). Lorsqu'on travaille à l'échelle des épisodes pluvieux, ces données sont décomposées au pas de temps horaire et doivent intégrer le cycle diurne. La correction s'effectue à partir des données du rayonnement global. Si ces informations ne sont pas disponibles on applique alors la transformation définie par (i) une valeur nulle, la nuit entre 18 heures et 6 heures du matin, (ii) une variation sinusoïdale, entre 6 heures du matin et 18 heures, avec un maximum à 12 heures.

En ce qui concerne le site de Rezé, on dispose de données pluviométriques et débit-

métriques valides sur la période du 1/1/1991 au 1/1/2001 au pas de temps de  $6mn$ . Les données d'évapotranspiration sont disponibles à partir de 1992. Ainsi l'étude du bassin de Rezé est réalisée sur la période de 1992 à 2001 soit 10 ans.

## 1.3 Sélection des évènements pluvieux

### 1.3.1 Caractérisation des évènements pluvieux

En hydrologie, le coefficient d'écoulement est fréquemment utilisé pour résumer le comportement de bassins versants. Ce coefficient est défini par le rapport du volume d'eau recueilli à l'exutoire du bassin sur le volume d'eau précipité. Ainsi, le début d'un évènement serait défini par le début de la pluie « significative » et la fin comme le tarissement du débit résultant de la pluie identifiée précédemment. Idéalement deux évènements pluvieux sont séparés par une période dite sèche (Annexe B).

La définition des évènements pluvieux n'est donc pas universelle, elle doit s'adapter à la forme des données, à la nature du bassin (temps de concentration). L'identification des évènements pluvieux se déroule en deux étapes. La première étape consiste à identifier les périodes de pluie « significative », la seconde consiste à ajuster les limites des périodes définies aux valeurs de débits.

### Caractérisation des pluies

Le procédé utilisé pour identifier les périodes sèches des périodes pluvieuses s'inspire de travaux de thèses réalisés au LCPC (F.Rodriguez, 1999)(E.Berthier, 1999). La description des algorithmes mis en jeu est donnée en annexe B. L'identification débute lorsqu'une intensité pluvieuse seuil est dépassée. Le début et de la fin de l'évènement sont identifiés lorsque des périodes d'intensité et de volume de précipitation faibles sont rencontrées.

Dans cette étude un évènement pluvieux correspond à une hauteur de précipitation dépassant  $0,4mm$ , l'intensité pluvieuse étant supérieure à  $1mm/h$ . Les limites des évènements se caractérisent par des intensités  $< 1mm/h$  et une hauteur de précipitation  $< 2mm$  pendant 1 heure. En d'autres termes un évènement provoque plus de deux basculements d'auge sur chaque pluviomètre et au moins deux basculements durant 1 même pas de temps sur un même pluviomètre.

### Paramètres d'ajustement aux débits

Cette seconde phase de traitement scrute la variation des débits à l'exutoire en fin d'épisode pluvieux, elle prolonge l'évènement jusqu'à ce que le débit ne varie que très faiblement. Ici le critère de stabilité est défini par la somme, sur une durée test, des différences de volumes écoulés entre chaque pas de temps. La fin de restitution est identifiée lorsque

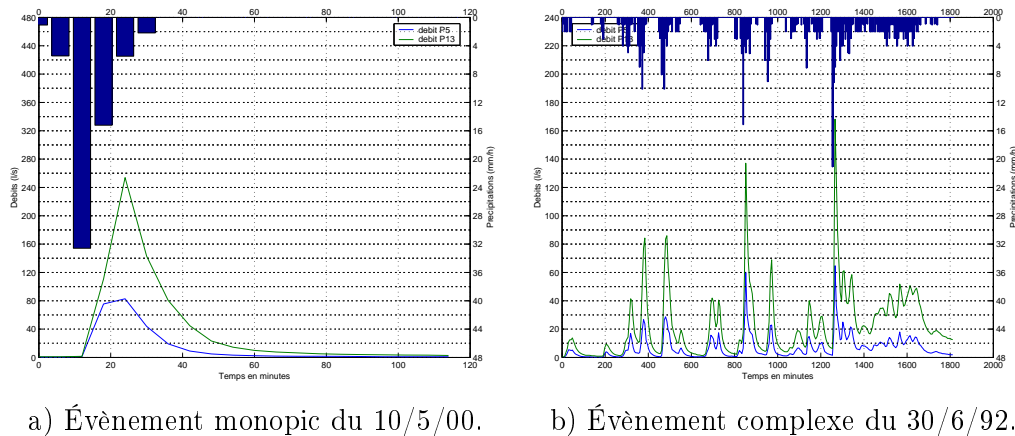


FIG. 1.1 – Variabilité des évènements pluvieux.

moins de  $0,004mm$  d'eau sont comptabilisés sur une durée de 1 heure (soit une variation de hauteur d'eau écoulee inférieure à  $1/100^{\text{ème}}$  de la hauteur minimale de pluie). Lorsque entre deux épisodes pluvieux consécutifs, aucune stabilisation des débits n'est observée, les deux épisodes sont regroupés en un seul évènement.

### 1.3.2 Résultats de la sélection et critiques

La procédure de sélection, appliquée aux 10 années d'observation, permet d'isoler 1490 évènements pluvieux. La figure 1.1 illustre le résultat de la procédure de détermination des limites d'évènements pour deux cas distincts. Pour chaque évènement sélectionné par le programme, un jeu de paramètres descriptifs est renseigné et constitue la base de données sur laquelle s'appuie la suite de l'étude. Finalement chaque évènement pluvieux est résumé par :

- la date de début d'évènement (contexte saisonnier) ;
- la durée d'évènement ;
- la hauteur de pluie précipitée lors de l'évènement ;
- l'intensité pluvieuse moyenne ;
- l'intensité pluvieuse maximale ;
- l'évapotranspiration potentielle durant l'évènement ;
- la durée de la période de temps sec précédent l'évènement ;
- l'évapotranspiration potentielle durant la période de temps sec ;
- la hauteur de pluie pendant la période de temps sec ;
- les débits cumules à l'exutoire ;
- le débit moyen de l'évènement ;
- le débit maximum de l'évènement ;
- les coefficients d'écoulement pour chaque sous bassin ;
- le coefficient d'écoulement de l'ensemble des deux bassins.

Les paramètres que nous avons choisi permettent d'intégrer dans l'étude les évènements de faible intensité et de faible volume.

## 1.4 Analyse statistique des évènements pluvieux

### 1.4.1 Analyse des paramètres relatifs aux précipitations

La répartition des principales caractéristiques des évènements pluvieux est donnée dans la figure 1.2.

#### Hauteur de précipitation

Les hauteurs de précipitation sont comprises entre 0,4 et 74mm avec une valeur moyenne de 4mm. Presque la moitié des précipitations sont inférieures à 2mm, 25% dépassent 5mm. L'évènement le plus important est aussi le plus long et dure plus d'une journée. Les évènements les plus longs correspondent à des groupements d'épisodes de pluies trop proches pour que la stabilisation des débits ait lieu. Si on ne tient pas compte de tels regroupement, la hauteur moyenne d'une averse vaut 3,8mm.

#### Durée des précipitations

Les précipitations durent de quelques minutes à plusieurs heures (6 minutes à 39 heures). 90% des épisodes durent moins de 5 heures, 25% moins de 1 heure. La pluie médiane dure 2 heures. La pluie moyenne dure 3 heures et 20 minutes.

#### Intensité moyenne

Les intensités moyennes sont réparties entre 0,1 et 15mm/h. La grande majorité des intensités est inférieure à 1mm/h, moins de 15% des valeurs dépassent 1,5mm/h. La moyenne des intensité avoisine 0,9mm/h.

#### Pic d'intensité

Plus de la moitié des évènements est caractérisé par une intensité maximale inférieure à 5mm/h (moyenne sur 6mn), la plus forte intensité relevée atteint 83,85mm/h sur 6mn et les intensités supérieures à 10mm/h sur 6mn représentent 15% de l'échantillon.

#### Durée de temps sec

La durée du temps sec précédant la pluie est très variable, la durée la plus courte vaut 72 minutes, la plus longue s'étend sur plusieurs semaines. La majorité des évènements suivent une période de temps sec inférieure à 15 heures, la durée moyenne avoisine 45 heures.

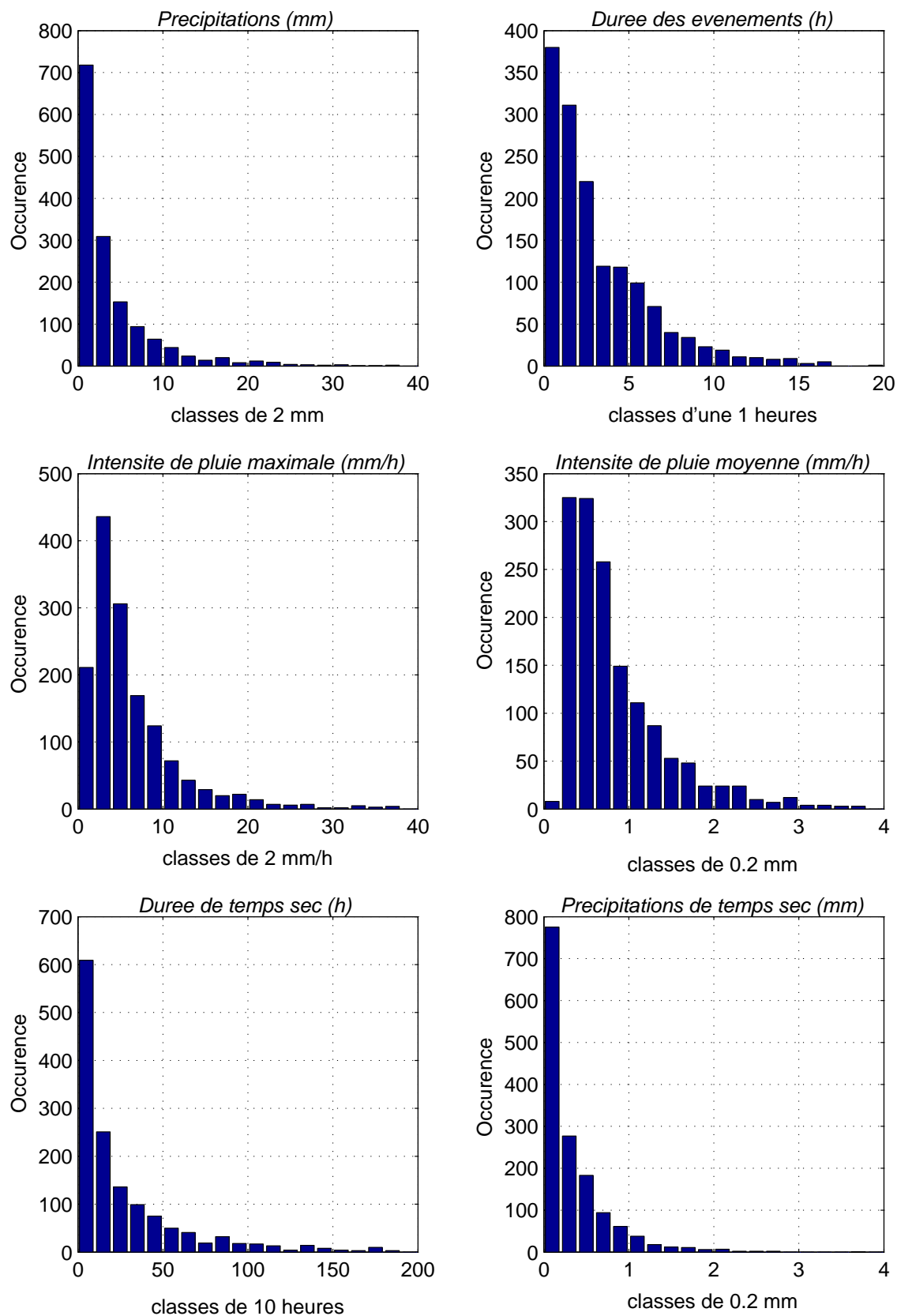


FIG. 1.2 – Caractéristiques des évènements pluvieux.

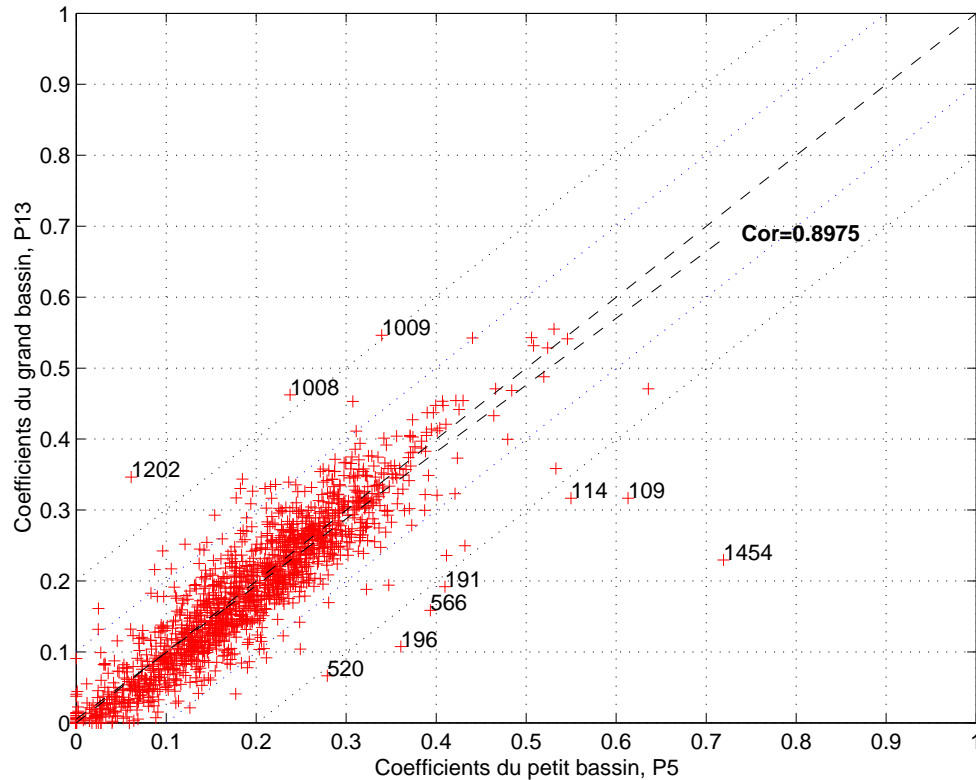


FIG. 1.3 – Corrélation des coefficients d'écoulements des bassins de Rezé.

Les lignes pointillés bleus délimitent la zone où  $\Delta CE < \sigma$  (écart-type).

Les lignes pointillés noirs délimitent la zone où  $\Delta CE < 2\sigma$ .

#### 1.4.2 Analyse des restitutions - Coefficient d'écoulement

Le coefficient d'écoulement est calculé pour chaque évènement selon la formule :

$$CE = \frac{\text{Volume écoulé à l'exutoire}}{\text{Lame d'eau précipitée} \times \text{Surface du bassin}}$$

#### Validation des évènements

Les deux bassins sont exposés aux mêmes intempéries et possèdent des caractéristiques morphologiques proches. On s'attend donc à ce que leurs comportements hydrologiques soient semblables. La relation existant entre les CE des deux bassins pour un même évènement nous informe sur la qualité des données utilisées. Cette relation est illustrée dans la figure 1.3. Le coefficient de corrélation linéaire<sup>2</sup> entre les séries de coefficients des bassins vaut 0,893, ce qui confirme simultanément la similarité de comportement et valide indirectement les mesures effectuées.

Cependant quelques évènements présentent un écart relativement prononcé d'un bassin à l'autre ( $\Delta CE > 2\sigma$ ). Comme leur comportement diffère des l'ensemble des valeurs, ces

<sup>2</sup>Ce coefficient est donnée par :  $r = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{S_x S_y}$  où  $S_x$  et  $S_y$  sont les écarts-types de x et y  
 $S_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$  et  $S_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$  (G.Saporta, 1990)

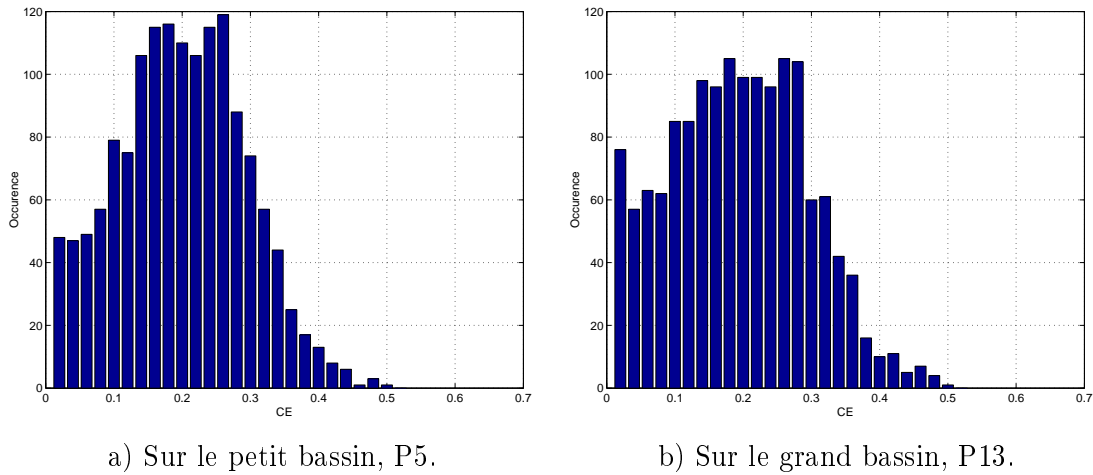


FIG. 1.4 – Répartition des valeurs de coefficient d'écoulement des bassins de Rezé.

évènement sont considérées comme non valides et écartés dans la suite de l'étude. Parmi la dizaine d'évènements constituant ce groupe, les épisodes 1454 et 191 présentent des valeurs erronées de débit, les autres présentent des débits de base élevées (avant et après l'épisode pluvieux), hétérogènes d'un bassin à l'autre.

L'histogramme des coefficients d'écoulements est illustrée par la figure 1.4. Le coefficient d'écoulement varie théoriquement entre 0 (pas de restitution) et 1 (restitution complète du volume précipité). En pratique, ce domaine est plus restreint, les évènements qui restituent plus de la moitié de la pluie sont rares. La distribution des coefficients d'écoulement se décompose en deux parties :

1. un groupe de valeurs nulles ou très faibles ( $CE < 0,02$ ), qui caractérisent des situations qui n'engendrent quasiment pas d'écoulement. Ces situations qui se produisent en début d'évènement pluvieux peuvent servir à caractériser les pertes initiales à l'écoulement (ce groupe est très sensible au critère de sélection d'évènements),
2. le reste des évènements, répartis selon une courbe de Gauss centrée autour des valeurs de 20% avec un écart type proche de 10%. Les coefficients moyens valent 20% sur P5 et 19% sur P13.

Le premier groupe de valeur, inexistant dans les études précédemment citées, résulte des paramètres choisis, à savoir une hauteur seuil de sélection d'évènement de 0,4mm contre 2mm pour les travaux existants. Ce groupe d'évènements ne sera pas pris en compte pour construire les modèles d'écoulement développés dans le second chapitre.



### 1.4.3 Analyse des évènements à restitution négligeable

#### Principe de sélection

On cherche les évènements pour lesquels le débit à l'exutoire est très faible voir négligeable. Cependant, en hiver, les infiltrations de la nappe dans le réseau génèrent un débit soutenu qui fausse la valeur du coefficient d'écoulement observé. La sélection des pluies non ruisselantes est donc effectuée par comparaison du débit moyen au débit de pointe. Pour l'ensemble des évènements étudiés, on considère qu'un évènement est significatif à l'exutoire lorsque la valeur du pic de débit dépasse (i) le double du débit moyen de l'évènement (ii) l'intensité moyenne annuelle. On identifie avec ces paramètres environ 300 évènements à restitution non conséquente.

#### Caractéristiques hydrologiques des évènements

Les coefficients d'écoulement de ces évènements varient selon une large gamme entre 0 et 40% ( dans ce cas, un débit de base élevé accompagne une pluie faible). 90% des évènements ont un coefficient d'écoulement inférieur à 20% et la moitié restituent moins de 7,5%.

La durée des évènements durent généralement moins de deux heures. Les pics d'intensité pluvieuse sont peu élevés 50% des valeurs sont inférieurs à  $2mm/h$ , presque la totalité des intensités sont  $<4mm/h$ , l'intensité la plus forte vaut  $6mm/h$ . L'intensité moyenne des pluie vaut  $0,4mm/h$ . Les durée de temps sec s'étalent entre 1 heure et 20 jours, mais la majorité des valeurs sont inférieures à un jour. Le point commun de tous ces évènements est leur hauteur d'eau : tous ont une hauteur inférieure à  $2mm$  et 75% des évènements sont des épisodes pluvieux de moins d' $1mm$ . Ce résultat confirme que les pertes initiales à l'écoulement avoisinent la valeur de  $1mm$ .

### 1.4.4 Analyse sommaire du ruissellement du bassin

1071 évènements donnent lieu à un ruissellement significatif. La répartition des coefficients d'écoulement de cet échantillon est donnée dans la figure 1.7. Les histogrammes des coefficients d'écoulement des bassins P5 et P13 sont proches et s'apparentent à des lois de Gauss de moyennes 22,4% et 22%, avec des écarts-types de 7,8% et 8,5%. Ainsi la moyenne du coefficient d'écoulement est inférieure aux coefficients d'imperméabilisation des bassins (37% et 39%) et seulement 3,3% des valeurs lui sont supérieures. Ces résultats sont comparables à ceux établis sur le jeu de données entre 1991 et 1998<sup>3</sup> (E.Berthier et al., 2001).

<sup>3</sup>La sélection est effectuée avec une intensité pluvieuse seuil de  $5mm/h$ , la période minimale de temps sec est fixée à 30 minutes, les données sont au pas de temps de  $6mn$ . La distribution est centré sur 21%, l'écart type vaut 8%.

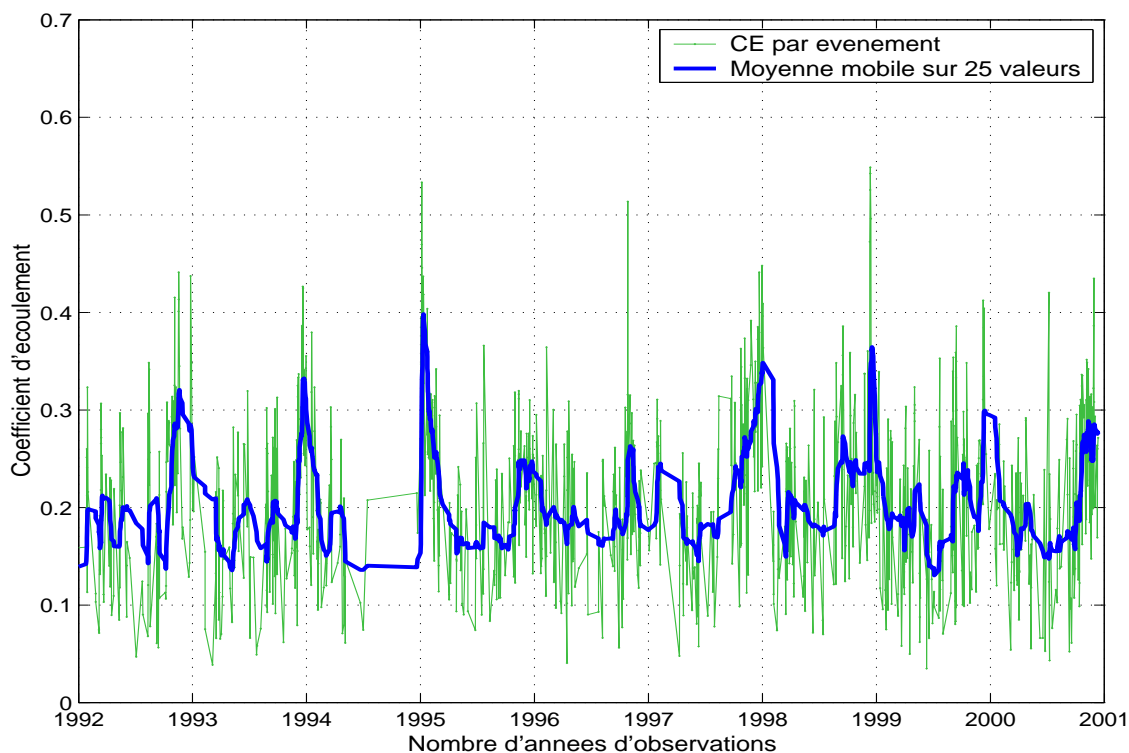


FIG. 1.5 – Variabilité chronologique des coefficients d'écoulements des évènements pluvieux du bassin de Rezé.

### Variabilité du coefficient d'écoulement

La variabilité du coefficient d'écoulement, entre deux évènements consécutifs, est illustrée dans la figure 1.5. On remarque aussi que la chronologie des coefficients présente caractère périodique mis en évidence en réalisant une moyenne glissante sur 51 évènements (l'évènement de référence les 25 précédents et les 25 suivants, soit les données d'un trimestre environ). Cette tendance se répète chaque année : une moyenne de coefficient faible en milieu d'année (période estivale) et élevée en début et en fin d'année (période hivernale).

Finalement les variations des coefficients d'écoulements à l'exutoire d'un bassin résultent de la combinaison de deux composantes :

- une première, saisonnière et «continue» ;
- une seconde à l'échelle de l'épisode pluvieux.

### Modèle des pertes initiales et coefficient de ruissellement

Le schéma à pertes initiales et coefficient de ruissellement constant est traditionnellement utilisé pour simuler la formation des écoulements urbains lors des évènements pluvieux exceptionnels (B.Chocat, 1997). Ce schéma établit une relation linéaire entre la lame d'eau

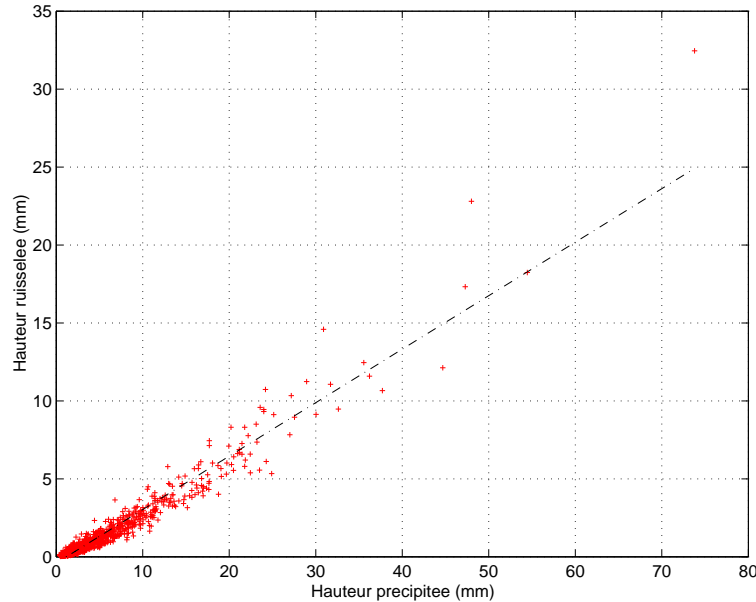


FIG. 1.6 – Ajustement du modèle des pertes initiales et du coefficient de ruissellement constant.

précipitée et la lame d'eau ruisselée durant un évènement :

$$Hr = Cr(Hp - PI)$$

avec	
$Hr$	hauteur d'eau ruisselée,
$Hp$	hauteur d'eau précipitée,
$Cr$	coefficient de ruissellement,
$PI$	pertes initiales.

La relation entre les deux variables est forte, la valeur du coefficient de corrélation vaut 0,966 (figure 1.6). Le coefficient de ruissellement obtenu par cet ajustement vaut 34,4%, valeur relativement proche du coefficient d'imperméabilisation (38,5%).

Les pertes initiales sont estimées à 1,25mm sur l'ensemble du bassin (1,18mm pour P5 et 1,27mm pour P13). Cette valeur est proche du seuil précédemment établi lors de la caractérisation des évènements sans ruissellement.

Les résultats de la reconstitution par la relation de Chocat du coefficient d'écoulement sont présentés dans le figure 1.7. La représentation du nuage de point entre les coefficients d'écoulement simulées et observées indique que le modèle n'est pas satisfaisant dans son ensemble. Le coefficient de corrélation linéaire entre les deux séries de données est relativement faible ( $r=0,45\%$ ) et surtout la dispersion des valeurs autour de la première bissectrice est relativement prononcée.

La répartition des coefficients simulés montre que le modèle est plutôt adaptée aux évènements majeurs et exceptionnels dont les fortes hauteurs de précipitations génèrent un ruissellement important. Les évènements mineurs ou modérés sont au contraire mal

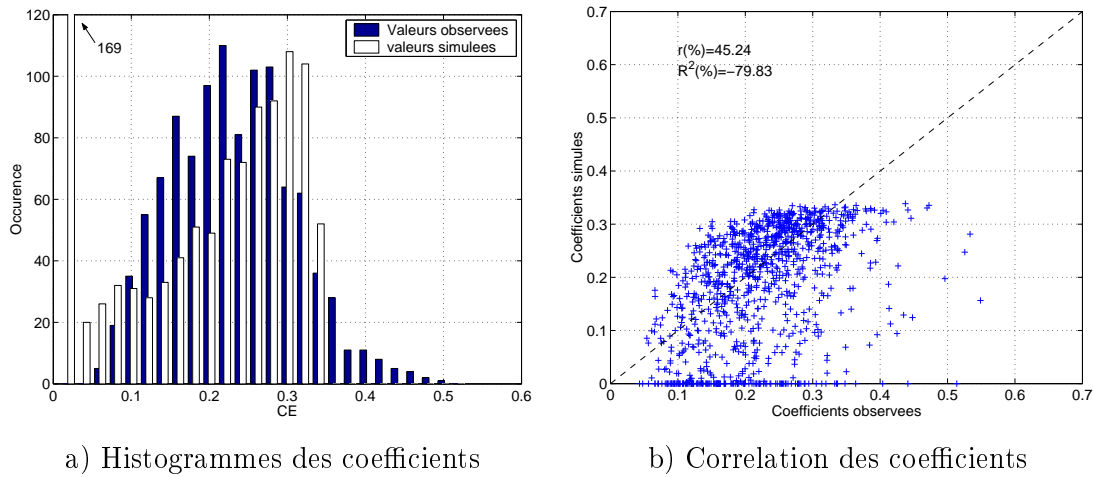


FIG. 1.7 – Comparaison des CE observés et reconstitués sur le bassin de Rezé.

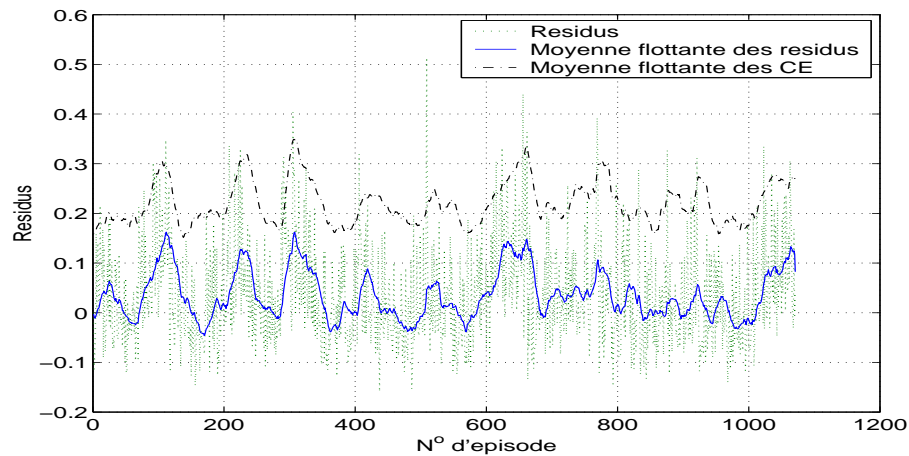


FIG. 1.8 – Répartition chronologique des résidus entre CE reconstitués et observés.

reproduits par le modèle urbain classique. Aussi ce modèle ne permet pas d'expliquer la variabilité des coefficients qui concerne des évènements de même hauteur de précipitations (E.Berthier et al., 2001).

La représentation des résidus (figure 1.8), entre valeurs observées et valeurs reconstituées par le modèle, montre que il ne restitue pas la tendance saisonnière du coefficient d'écoulement. En effet la moyenne mobile effectuée sur les résidus à la simulation présente des variations similaires à la moyenne mobile des coefficients observés.

L'origine de cette composante doit donc être précisée. Doit-elle être considérée comme un paramètre «indépendant» de la formation du débit par les précipitations, donc écartée du calcul ou faut-il, au contraire, la conserver comme un paramètre explicatif de la restitution ?

## Chapitre 2

# Modèles d'analyse et de synthèse statistique du comportement du bassin

Dans le chapitre précédent, nous avons vu que le modèle urbain classique : coefficient de ruissellement et pertes initiales constantes, n'est pas capable de reproduire la variabilité du comportement d'un bassin. La connaissance de la hauteur d'eau, seule, n'est pas suffisante pour expliquer la réponse hydrologique à un épisode pluvieux. Les surfaces perméables et imperméables, non connectées aux réseaux, ainsi que les conditions climatiques semblent influencer l'écoulement. L'étude menée ici cherche à déterminer l'explication éventuelle apportée par les paramètres hydrologiques et météorologiques définis au chapitre précédent explicatifs du comportement des bassins versants.

### 2.1 Le modèle de régression linéaire multiple

#### 2.1.1 Principe de calcul

On cherche à expliquer les variations d'une grandeur, appelée variable à expliquer ( $y$ ) par un ensemble de  $n$  autres grandeurs appelées variables explicatives ( $x_i$  avec  $i \in [1..n]$ ). La régression linéaire multiple permet de trouver la combinaison linéaire des variables explicatives qui reconstituent la plus grande part de la variabilité de la grandeur expliquée. Mathématiquement on cherche la formule linéaire  $y^* = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n$  telle que  $y^*$  soit le plus proche possible de  $y$ . On exige généralement que  $\|y - y^*\|^2$  soit minimal : c'est le critère des moindres carrés.

La qualité d'ajustement est estimée avec le coefficient de détermination,  $R^2$  qui s'interprète comme le rapport de la variance expliquée par la régression et la variance de la

variable expliquée.

$$R^2 = \frac{\sum_i (y_i - \bar{y})^2 - \sum_i (y_i - y_i^*)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}$$

Si  $R^2 = 1$ , l'ajustement est parfait.

De plus, on souhaite sélectionner les variables explicatives les plus significatives. On fait alors appel à la méthode de régression ascendante. La première étape consiste à choisir les variables qui donnent la meilleure régression. On part de la meilleure régression à une variable puis on ajoute celle qui fait progresser le plus le  $R^2$ . On procède ainsi jusqu'à épuisement des variables. A chaque étape on en profite pour réaliser le test de type Student sur les variables qui mesurent le caractère significatif de la relation linéaire entre les variables expliquées et explicatives.

### 2.1.2 Résultats préliminaires

La régression multiple et la sélection des variables est réalisée sur les 1380 événements donnant lieu à un ruissellement significatif, avec l'ensemble des paramètres hydrologiques décrits lors de la sélection des événements.

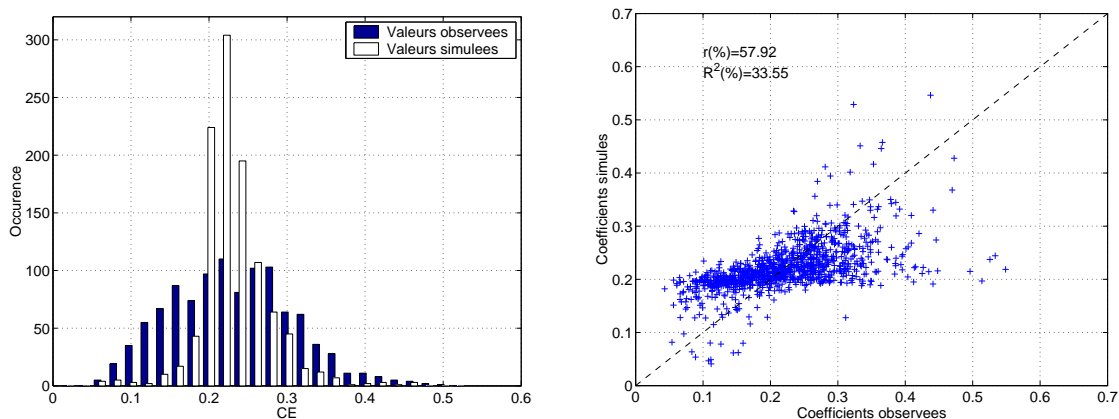
La matrice de corrélation regroupant les coefficients de corrélations linéaires de tous les couples de paramètres est donnée dans le tableau 2.1.

TAB. 2.1 – Matrice des coefficients de corrélations linéaires des variables, classés dans l'ordre décroissant de signification

Rang	Variabes	CE	PT	DTS	Imoy	ETP	Durée	Imax	ETPS	PTS
	CE	1	0,51	-0,25	0,45	0,08	0,41	0,41	-0,22	-0,128
1	PT		1	-0,03	0,54	0,31	0,81	0,47	-0,04	0,01
2	DTS			1	-0,03	0,53	-0,01	-0,06	0,83	0,53
3	Imoy				1	0,10	0,13	0,80	-0,01	-0,06
4	ETP					1	0,36	0,20	0,01	0,00
5	Durée						1	0,14	0,36	0,07
6	Imax							1	-0,01	-0,08
7	ETPS								1	0,32
8	PTS									1

CE : coefficient d'écoulement, DUREE des précipitations, IMOY : intensité moyenne de pluie, IMAX : pic d'intensité pluvieuse, PT : hauteur de précipitations, ETP : évapotranspiration potentielle durant la pluie, DTS : durée de temps sec, ETPS : évapotranspiration potentielle de temps sec, PTS : pluie de temps sec.

Les 4 premières variables (*PT*, *DTS*, *Imoy*, *ETP*) sont significatives à 100%. Les trois dernières offrent des degrés de signification compris entre 60% et 99%, mais expliquent à elles trois moins de 1% de la variance. L'essentiel de l'explication est apporté par les



a) Histogrammes des CE simulés et observés. b) Correlation des CE simulés et observés.

FIG. 2.1 – Résultats de simulation avec le modèle linéaire multiple.

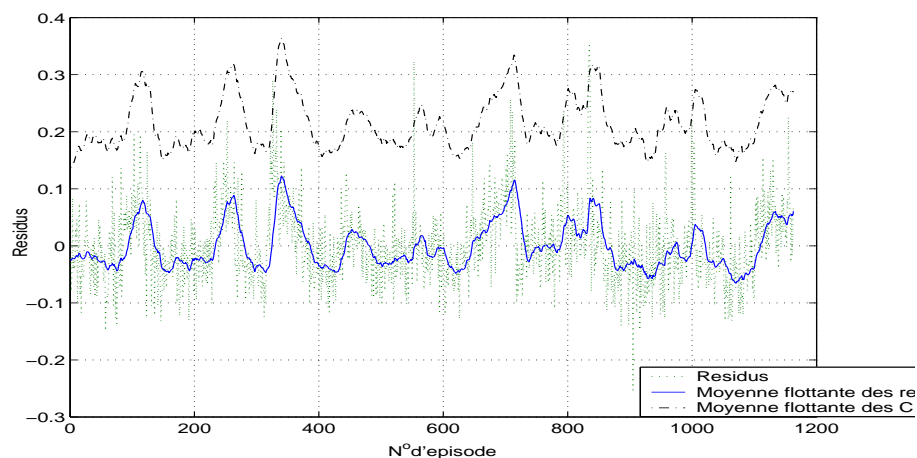


FIG. 2.2 – Valeurs des résidus de simulation des coefficients d'écoulements.

4 premières variables : la hauteur de pluie, la durée de temps sec, l'intensité pluvieuse moyenne et l'évapotranspiration potentielle durant la pluie.

A partir des relations linéaires extraites de la régression et des variables significatives nous avons reconstruit le comportement théorique du bassin de Rezé. La comparaison des coefficients d'écoulement théoriques et réels est illustrée dans la figure 2.1. Le coefficient de corrélation ( $r$ ) obtenu entre les valeurs observées et les valeurs simulées par le modèle de régression vaut 0,58. La simulation explique 40% de la variance des coefficients d'écoulement réels ( $R^2$ ). L'histogramme des coefficients reconstitués à l'aide de toutes les variables (figure 2.1.a) montre que la variabilité du coefficients reconstitué est beaucoup moins importante que celle observée.

Pour identifier d'éventuels paramètres explicatifs manquants, nous avons observé la répartition chronologique des résidus de la simulation (figure 2.2). La représentation de la moyenne mobile des résidus sur 51 événements montre que la composante saisonnière

identifiée au chapitre précédent n'est pas reproduite par la combinaison des variables explicatives. Cette composante saisonnière explique à elle seule 18% de la variabilité des coefficients réels, elle doit donc être introduite dans le modèle linéaire. De plus certaines relations, de nature physique, entre variables sont connues, l'introduction de telles relation peut être bénéfique sur deux plans : (i) elles contribuent à la diminution du nombre de variables explicatives, (ii) elles contribuent à rapprocher le modèle d'ajustement statistique des contraintes physiques appliquées aux variables. Deux corrections sont envisagées :

1. la correction des pluies brutes par le volume d'évapotranspiration potentielle ; on définit alors une nouvelle variable de pluie appelée pluie résiduelle :  $P_{Res} = PT - ETP$  ;
2. La définition de l'«état hydrique» du bassin versant ; ce nouveau paramètre décrit la capacité du bassin versant à perdre un volume de précipitation en début d'épisode pluvieux, pour compenser ses pertes en eau, évapotranspirées, lors de la période de temps sec. Ces pertes initiales sont alors définies par :

$$\begin{cases} PI = 0 & \text{si } ETPS - PS < 0, \\ PI = \min(ETPS - PS; Hmax) & \text{sinon.} \end{cases}$$

$PI$  définit les Pertes Initiales ,  $ETPS$  l'évapotranspiration durant le temps sec et  $Hmax$  définit les pertes maximales, c'est-à-dire la capacité de stockage d'eau maximale des surfaces du bassin. On attribuera à  $Hmax$  la valeur qui permet d'obtenir les meilleurs ajustement linéaires.

### 2.1.3 Modèle linéaire composé

Dans ce modèle, le coefficient d'écoulement observés est exprimé comme la somme de deux composante : (i) une valeur saisonnière du coefficient d'écoulement récurrente chaque année, (ii) une valeur résiduelle. Le coefficient d'écoulement s'écrit donc :

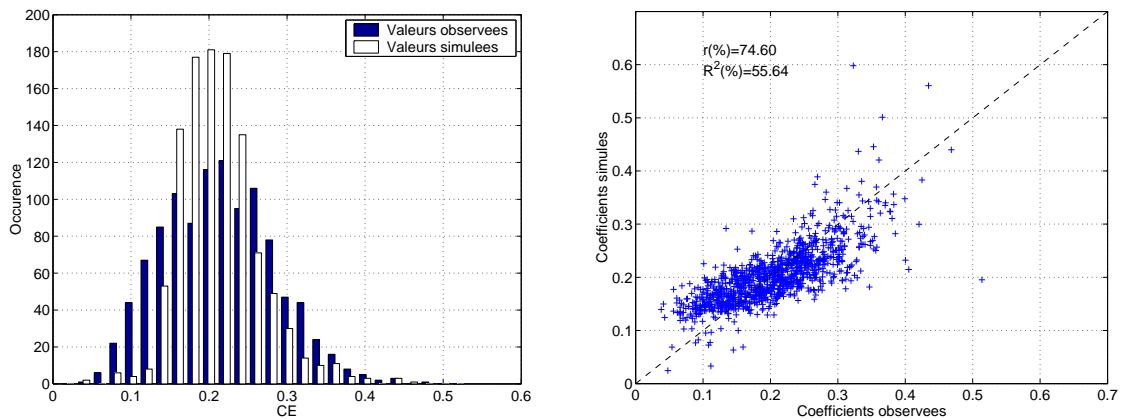
$$CE = \overline{CE} + \delta CE$$

La composante saisonnière ( $\overline{CE}$ ) est calculée en effectuant la moyenne mensuelle des coefficients d'écoulements observés sur l'ensemble des années de mesure. Cette méthode n'est pas la plus précise mais offre une plus grande robustesse.

Le jeu de valeurs résiduelles constitue la nouvelle variable à expliquer. Une nouvelle procédure de régression, de selection de variables et de simulation est réalisée. Les résultats des indicateurs d'ajustement et de corrélation, présentés par la suite, s'appuient sur les données reconstituées. Les coefficients reconstitués sont définis par  $CE^* = \overline{CE} + \delta CE^*$ . Les variables concernées par ce calcul sont :

- la durée de pluie,
- la pluie résiduelle,
- l'intensité pluvieuse moyenne,





a) Histogrammes des CE simulés et observés. b) Corrélation des CE simulés et observés.

FIG. 2.3 – Résultats des reconstitutions du coefficient d'écoulement à partir du modèle linéaire composés.

- l'intensité pluvieuse maximale sur  $6mn$ ,
- la durée de la période de temps sec,
- l'état hydrique du bassin versant.

Les résultats de la simulation sont représentés dans la figure 2.3. La variabilité des coefficients d'écoulement simulés est comparable à celle des coefficients observés à une anomalie près concernant les faibles coefficients (cf. histogrammes). Le coefficient de corrélation entre les coefficients d'écoulement réels et simulés vaut 0,76 et la régression explique presque 58% de la variance des coefficients d'écoulement observés.

En ce qui concerne l'ajustement linéaire des variables explicatives et la composante résiduelle, avec le jeu de variables modifiées, l'ordre de sélection est complètement modifié. Les seuils de signification des variables sont toujours élevés. Les 3 premières variables sélectionnées sont significatives à 100%, on trouve dans l'ordre : la pluie résiduelle, l'état hydrique du sol, l'intensité de pluie moyenne. Les variables de durée de pluie et de temps sec sont significatives à 99% environ, l'intensité de pluie maximale à 53%. La sélection de la variable «état hydrique du bassin versant» au deuxième rang confirme l'importance du rôle des sols, à stockage ou pertes variable, dans l'explication de la variabilité du comportement hydrologique des bassins urbains. La valeur optimale d'ajustement calculée pour  $Hmax$  vaut  $0,9mm$ . Cette valeur s'accorde bien avec les observations concernant les événements sans restitution et les évaluations des pertes initiales établies dans le chapitre précédent.

Finalement 4 variables sont nécessaires pour expliquer l'essentiel de la variabilité du comportement hydrologique du bassin de Rezé :

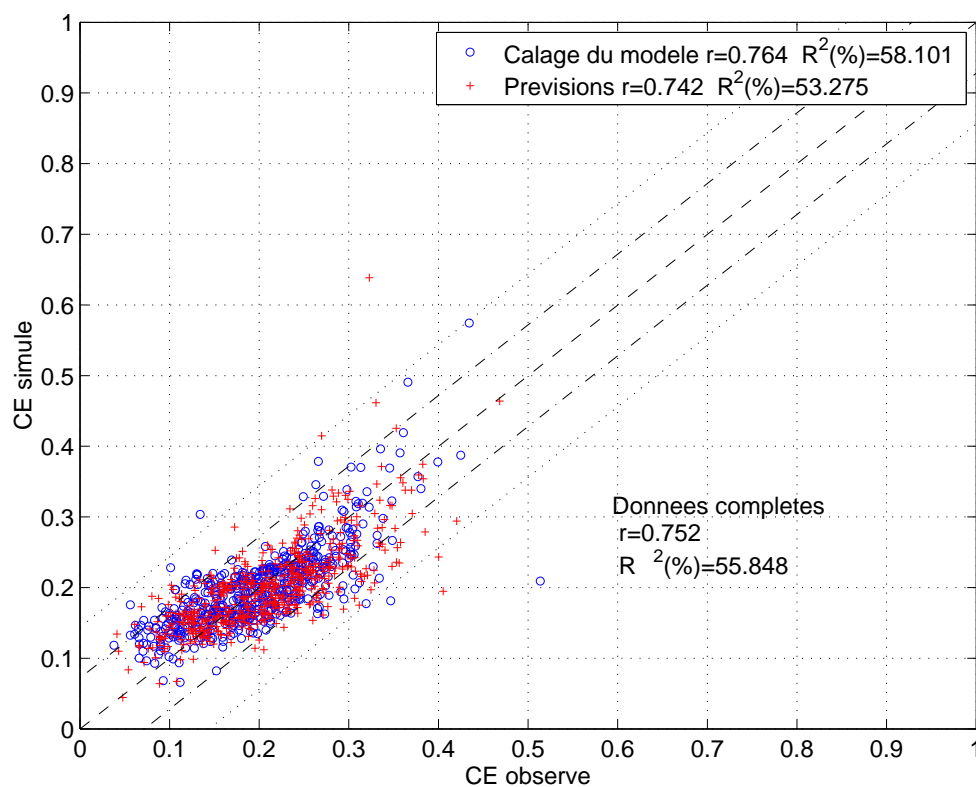


FIG. 2.4 – Evaluation de la capacité prédictive du modèle linéaire. Comparaison des résultats données pour les données de calage et les données prédites.

La composante saisonnière  
 La Pluie résiduelle  
 L'état hydrique du sol  
 L'intensité moyenne des pluies

#### 2.1.4 Robustesse du modèle

Cette partie tente de mettre en évidence la capacité du modèle à rendre compte d'une réalité physique plutôt que statistique (numérique). Une partie de l'échantillon, les 5 premières années de données (1992–1995 ; 645 évènements), est utilisée pour réaliser le calage du modèle, c'est à dire le calcul des coefficient de la combinaison linéaire optimale. La seconde partie de l'échantillon, les 4 années restantes (1997–2000 ; 638 évènements), sert à tester le modèle défini précédemment et vérifier si la relation définie sur le première partie des données est efficace . Pour ce test, on utilise le modèle composé avec les variables d'état hydrique du sol et de pluie résiduelle. Les résultats sont représentés dans la figure 2.4.

Les ajustement obtenus pour le calage sont similaires à ceux obtenus pour les prévisions. Ainsi le modèle de régression linéaire multiple fournit une loi de comportement détaillée et robuste qui traduit des relations physiques stables et permet d'obtenir une première

estimation correcte des coefficients d'écoulements passés et à venir à partir des seuls données hydro-météorologiques.

## 2.2 Le modèle de classification par partition

Le modèle de classification est un outil permettant de résumer selon un schéma stable le comportement, linéaire ou non-linéaire, d'un élément hydrologique. Il ne permet pas d'apporter une explication à une variable par la relation numérique avec d'autres variables.

### 2.2.1 Principe

Pour chaque variable, on réalise une partition de l'espace des valeurs observables. Ainsi chaque domaine de définition des variables est représenté par  $n$  intervalles de valeurs. Chaque évènement peut alors être décrit, non pas par les valeurs de chaque paramètre mais par les différents intervalles ou classes auquel il appartient. Par exemple si on considère les intervalles décrits dans le tableau 2.2, l'évènement de précipitation  $6,6mm$  et de durée de temps sec  $253min$  se définit aussi comme un épisode de classe 3 pour la pluie et de classe 2 pour le temps sec.

TAB. 2.2 – Exemple de partitionnement de domaine de définition de variables.

Classe	Pluie (mm)	DTS (minutes)
1	0,4-1	0-120
2	1-5	120-1440
3	5- $+\infty$	1440- $+\infty$

Ainsi avec  $p$  variables à  $n$  classes, l'espace entier des combinaisons de paramètres est «résumé» par  $n^p$  familles auxquelles peuvent être rattachées n'importe quel évènement. Lorsqu'on a statistiquement suffisamment d'évènements assimilés dans une famille on peut déterminer le comportement hydrologique moyen de la famille. On constitue alors un abaque qui informe sur le comportement de référence d'un élément hydrologique. Comparé au modèle de regression le principal avantage de cette méthode est qu'il conserve le caractère non-linéaire du comportement de l'élément résumé.

### 2.2.2 Calcul préliminaire

La simulation est réalisée selon les paramètres suivants :

- Les évènements de 1992 à 1996 servent à établir le modèle de référence de comportement, les évènements de 1997 à 2001 servent à tester la capacité prédictive du modèles.

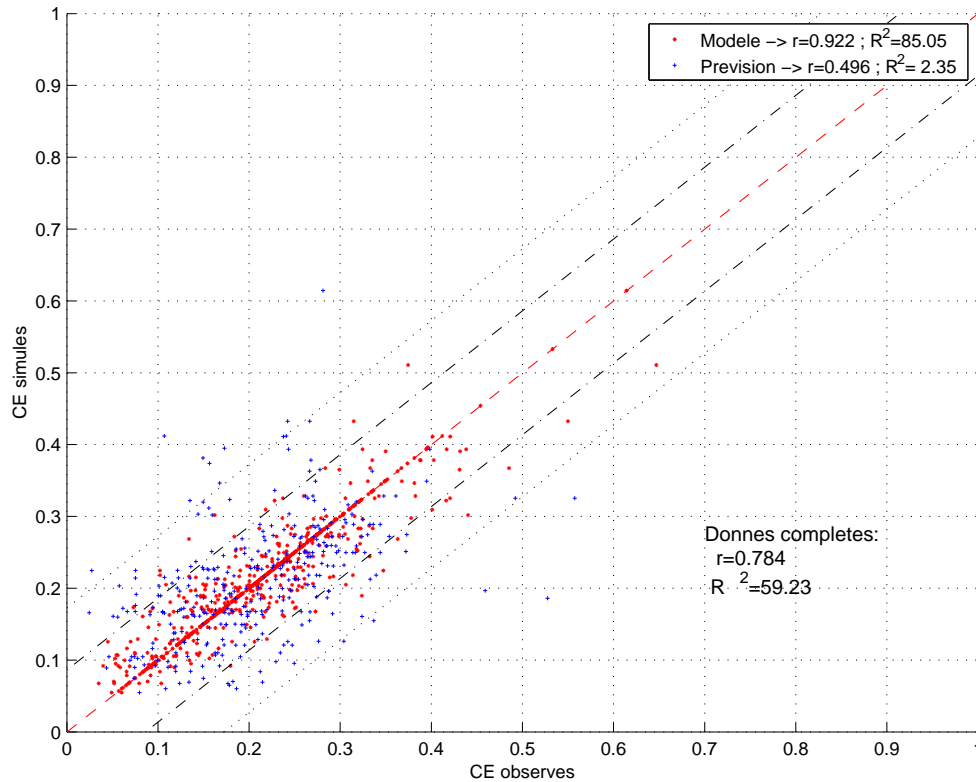


FIG. 2.5 – Correlation entre les valeurs simulées et observées selon le modèle de partitionnement.

- Les variables utilisées sont en nombre limité afin de ne pas générer trop de groupes. Les variables déclarées comme les plus significatives sont résumées par trois classes et la variation saisonnière définit par 2 classes identifiant une saison sèche et une saison humide.

Les résultats sont présentés dans la figure 2.5. Dans ces conditions, 54 familles sont susceptibles d'exister. En fait 53 familles sont référencées lors du calage et trois événements ne sont pas simulés lors de la prévision. La variance intraclasse est en général modérée, 88% des valeurs sont résumées par un coefficient d'écoulement distant d'une valeur inférieure à l'écart type de la série de données soit 10%. Dans cette configuration les valeurs du coefficient de corrélation ( $r = 0,7$ ) ainsi que celle du coefficient d'ajustement ( $R^2 = 55\%$ ) sont stables. Le schéma est robuste.

### 2.2.3 Ajustement des paramètres

Pour obtenir un résumé efficace il faut trouver un compromis entre le nombres d'évènements et le nombre de classes générées par le partitionnement. En effet la précision du modèle croit avec le nombre de classes et de variables, cependant la fiabilité et la robustesse du coefficient estimé pour une famille augmente lorsque le nombre d'évènements consti-

tuant la famille est important. Ainsi il faut réduire le nombre de variables aux variables les plus significatives, et choisir un nombre de classe qui puisse générer des familles de plus de 10 évènements.

Cette méthode a l'avantage d'être simple et de proposer une comparaison facile entre structures en confrontant les coefficients de familles identiques. Son utilisation pour des prévisions est par contre plus délicate car elle nécessite un très grands nombres d'évènements pour être vraiment fiable.

## 2.3 Le modèle de classification par similitudes

### 2.3.1 Principe de classification

La méthode qui suit s'inspire de principe de classification hiérarchique (G.Saporta, 1990). L'objectif consiste à fournir un ensemble de partitions de l'espace étudié dont les classes, de moins en moins fines, sont obtenues par regroupements successifs de parties. Une classification hiérarchique se représente par un dendrogramme ou arbre de classification (figure 2.6).

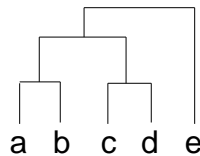


FIG. 2.6 – Dendrogramme ou arbre de classification.

Cet arbre est obtenu dans la plupart des méthodes de manière ascendante : on regroupe d'abord les deux individus les plus proches qui forment «un sommet», il ne reste plus que  $n - 1$  objets et on réitère le processus jusqu'à regroupement complet. Le problème consiste à définir une mesure de dissimilarité entre parties. Dans le modèle utilisé par la suite, les dissimilarités entre évènements sont mesurées par la méthode de Ward pour distances euclidiennes. Si l'on considère  $E$  (ensemble des évènements décrit par  $p$  variables) comme un nuage d'un espace  $\mathbf{R}^p$ , on agrège les individus qui font varier un minimum l'inertie intraclasse et un maximum l'inertie interclasse. L'inertie est définie comme la somme de carrés des distances qui séparent un évènement  $i$  de l'évènement moyen. Comme les variables ont des significations et des ordres de grandeurs très différents, pour mesurer la distance qui sépare deux individus, on utilisera la méthode Euclidienne standardisée (mat, 2000) :

$$d_{rs}^2 = (x_r - x_s)D^{-1}(x_r - x_s)'$$

ou  $x_r$  et  $x_s$  sont des vecteurs à  $p$  paramètres  
et  $D$  la matrice diagonale des variances associées.

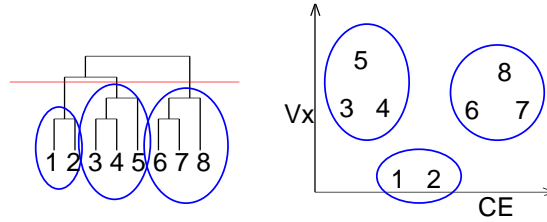


FIG. 2.7 – Constitution des groupes de référence.

Avec la méthode de Ward, l'indice de dissimilarité entre deux classes (ou niveau d'agrégation de ces deux classes) est alors égal à la perte d'inertie interclasse résultant de leur regroupement. Soit  $g_A, g_B$  les centres de gravité des deux classes,  $g_{AB}$  celui de leur réunion et  $p_A, p_B$  les poids des deux classes, alors  $g_{AB} = \frac{p_A g_A + p_B g_B}{p_A + p_B}$ . La variation d'inertie interclasse s'écrit :

$$\delta(A, B) = p_A d^2(g_A, g_B) + p_B d^2(g_B, g) - (p_A + p_B) d^2(g_{AB}, g) = \frac{p_A p_B}{p_A + p_B} d^2(g_A, g_B)$$

On construit alors un dendrogramme selon l'organisation des valeurs des  $\delta(A, B)$ . L'arbre de classification obtenu regroupe donc progressivement les événements qui ont les caractéristiques les plus proches : valeurs des différents paramètres hydrologique, mode de restitution des précipitations.

En réalisant des coupes horizontales dans la classification (figure 2.7) on isole des groupes homogènes d'événements qui peuvent être résumés par un événement de référence, tendance centrale du groupe considéré (obtenu par moyenne arithmétique par exemple) et une distance critique qui délimite la zone d'influence de l'événement de référence.

### 2.3.2 Reconstruction des données

Une fois que les événements de référence sont construits, il est possible de prévoir le coefficient d'écoulement d'un événement pluvieux en le comparant aux événements de références. La méthode est la suivante :

1. On calcule la distance euclidienne réduite qui existe entre l'événement à simuler et chaque événement modèle.
2. Si la distance séparant l'événement d'un référence est inférieur à la valeur critique, le coefficient d'écoulement de l'événement de référence le plus proche est affecté à l'événement.

La variabilité des coefficients simulés dépend de la variabilité des coefficients de référence ainsi que du nombre de groupes identifiés. nombre.

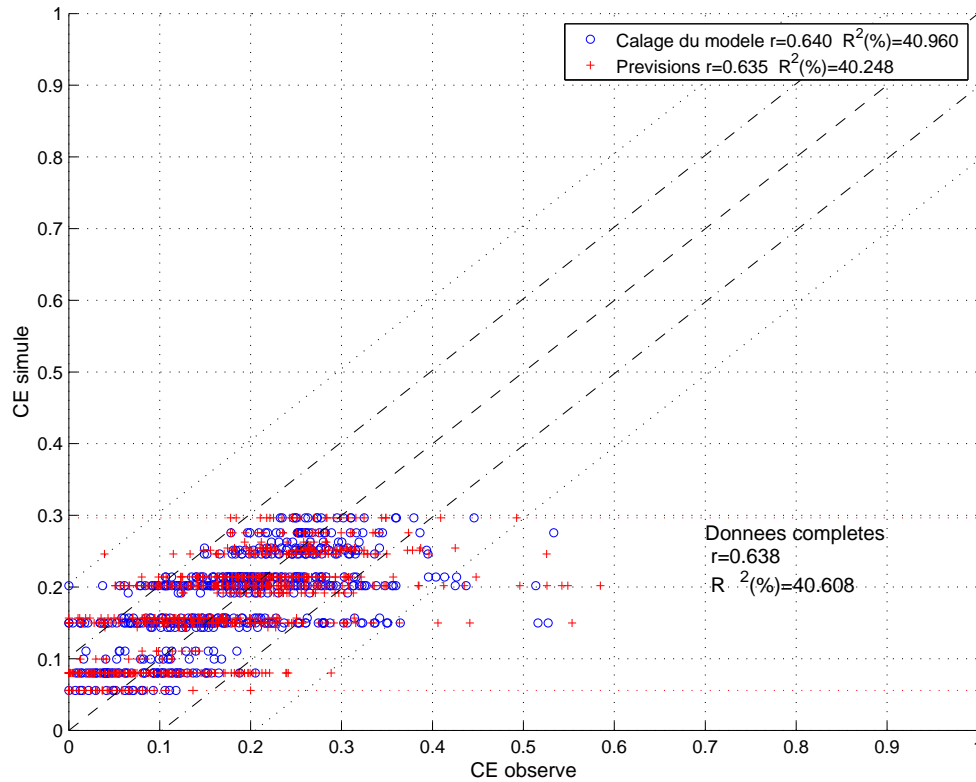


FIG. 2.8 – Reconstitution des coefficients d’écoulement par la méthode de classification hiérarchique.

### 2.3.3 Calculs

Le calcul des dissimilarités pour élaborer le modèle de référence est réalisé avec les 3 paramètres hydrométéorologiques les plus significatifs ( $P^*$ , ETPS, Imoy), la saison et le coefficient d’écoulement. En effet la réduction du nombre de critères d’agrégation évite de gonfler inutilement la mesure des dissimilarités entre événements et contribue à rendre plus homogènes les agrégats. Le calage du modèle est réalisé sur la première moitié des données seulement (1992-1996), l’autre moitié est utilisée pour tester la robustesse du modèle (1997-2001). Le nombre minimal d’événements nécessaire pour constituer un groupe est fixé à 10 de sorte que le calcul de l’événement moyen soit suffisamment représentatif. Les résultats de la simulation sont données dans la figure 2.8.

### 2.3.4 Résultats

Le reconstitution des coefficients d’écoulement établie à partir du modèle est relativement bonne pour la majorité des groupes. La variabilité des coefficients à l’intérieur des groupes est comparable à celle du modèle précédent.

Cette méthode de classification est un peu plus lourde à mettre en place mais présente l’avantage de constituer les groupes à posteriori, caractéristiques du comportement

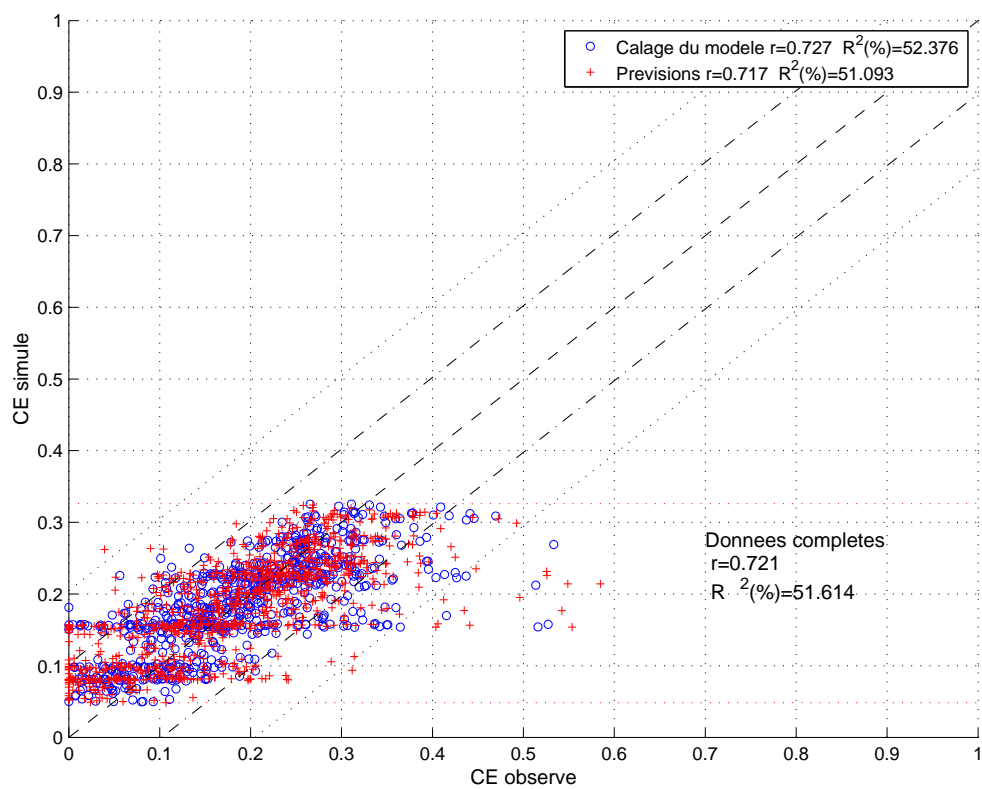


FIG. 2.9 – Reconstitution des coefficients d’écoulement par la méthode de classification hiérarchique. Reconstitution par moyenne des trois éléments de références les plus proches.

du bassin. Ce modèle de classification est aussi plus robuste que le précédent et permet d’obtenir une synthèse contenant plus d’informations. Ainsi le modèle peut donner lieu à des reconstitutions plus ou moins fidèles selon le mode de reconstitution établi à partir des informations des évènements de références (cf. figure 2.9).



## Chapitre 3

# Comparaison du comportement hydrologique des bassins et surfaces urbaines

Sur la base de modèles statistiques, nous avons montré précédemment qu'un jeu réduit de paramètres hydro-climatiques pouvait expliquer jusqu'à 60% de la variabilité du comportement du bassin urbanisé de Rezé. Ces résultats sont obtenus en combinant :

- le contexte hydrique saisonnier, dont la formation et le contrôle restent à élucider (contribution du sol, infiltration dues à la nappe...),
- les caractéristiques de l'épisode pluvieux et son environnement météorologique.

Ce schéma explicatif est-il transposable à d'autres bassins versants ou simplement une caractéristique propre au bassin de Rezé? Pour tenter de répondre à cette question, les modèles développés sur le bassin versant de Rezé ont été appliqués à trois types de structures urbaines, géographiquement proches : le bassin versant des Gohards et les surfaces revêtues expérimentales du LCPC (toits et chaussées routières).

### 3.1 Caractéristiques des éléments hydrologiques

#### 3.1.1 Le bassin des Gohards

Le bassin des Gohards est situé au Nord-Est de Nantes. Ce bassin est muni d'un réseau séparatif dont l'exutoire draine une superficie d'environ 180ha. Le bassin présente une forme très allongée d'environ 2,5km de long et 900m de large. La pente moyenne est de 1,1%

Le bassin présente une urbanisation assez variée. Il est compris entre deux axes routiers anciens, coupés par le boulevard périphérique, des voies ferroviaires et le tramway. L'urbanisation y est encore en plein essor et l'occupation du bassin se présente comme une

juxtaposition de différents type d'occupation du sol : habitat individuel ancien le long des axes, zones maraîchères en régression et zones d'activités industrielle et commerciales en expansion.

Le coefficient d'imperméabilisation réel n'est pas connu, son estimation cadastrale déduite de l'analyse hydrologique est de 38% (F.Rodriguez, 1999).

L'estimation des précipitations moyennes s'appuie sur les données des deux pluviomètres équipant le bassin. La mesure des débits à l'exutoire est réalisée par l'intermédiaire d'une sonde à effet Doppler qui mesure la hauteur d'eau et la vitesse d'écoulement.

Le site est suivi depuis le 15/7/1998, nous disposons de données validé de 1998 à 2000 soit 2 ans et demi de mesure.

### 3.1.2 Les surfaces du LCPC

Pour mieux comprendre le comportement hydrologiques des bassins urbanisés, le LCPC s'est doté de surfaces expérimentales témoins permettant de décrire individuellement le comportement des surfaces imperméabilisées constitutives des bassins versants urbains.

Ainsi deux tronçons de chaussées et deux toits sont instrumentés et suivis depuis le 1/8/2000. Les deux chaussées sont chacune instrumentées avec un pluviomètre et un débitmètre à auget, au niveau de l'avaloir. Les chaussées possèdent des superficies de  $481m^2$  et  $310m^2$  respectivement pour les lieux-dits du «manège» et de la «centrifugeuse».

Les deux surfaces de toits sont contiguës, elles sont équipées d'un pluviomètre commun et de débitmètres à auget. Les surfaces respectivement valent  $51m^2$  pour la partie exposée au sud et  $52m^2$  pour la partie exposée à l'est. Ces surfaces sont toutes deux inclinées de  $20deg$ . Les surfaces efficaces, projection sur un plan vertical, valent respectivement  $47,9m^2$  et  $48,8m^2$ .

Les premières données mesurées sur ces surfaces pendant une année d'observation ont conduit aux observations suivantes (L.Guilloteau, 2001) :

- Les comportements des toits diffèrent significativement. Cette divergence s'explique principalement par l'orientation différente des surfaces à la pluie et au vent ainsi qu'au rayonnement solaire.
- Les comportements des deux chaussées sont en général proches, mais quelques périodes sont douteuses suite à des apports latéraux dus au ruissellement sur les surfaces voisines. Ce problème, résolu à partir de 2001 réduit le nombre d'évènements à disposition.

Les résultats présentés dans ce chapitre sont déterminés à partir des moyennes des comportements observés sur chaque type de structure. Les calculs présentés dans la suite correspondent aux données recueillies entre le 1/8/2000 et le 31/12/2001.

## 3.2 Sélection des évènements pluvieux

La technique de sélection des évènements pluvieux est identique au premier chapitre. Un évènement est défini par une hauteur de précipitation supérieure à  $0,4\text{mm}$  et une intensité pluvieuse supérieure à  $1\text{mm/h}$  sur 1 pas de temps. Le pas de temps vaut 6 minutes, le critère de stabilité pour les débits vaut  $0,004\text{mm}$  soit  $1/100^{\text{ime}}$  de hauteur d'eau minimale. La procédure d'ajustement au débit débute à la fin de la période de test de fin d'évènement pluvieux afin de tenir compte du temps de concentration plus long existant sur le bassin des Gohards ( $T_{conc} = 20\text{min}$ ).

L'application de la procédure de sélection des évènements identifie :

- 1722 évènements sur Rezé en 10 ans (1992–2001),
- 485 évènements sur les Gohards en 3 ans (1998–2000),
- 237 évènements sur les chaussées en 1 an et  $\frac{1}{2}$  (juin 2000–2001),
- 264 évènements sur les toits en 1 an et  $\frac{1}{2}$  (juin 2000–2001).

### 3.2.1 Caractéristiques des pluies

Les distributions statistiques des variables caractérisant les épisodes pluvieux sont représentées dans la figure 3.1. Les éléments hydrologiques sont soumis à des conditions météorologiques comparables. Aucune précaution particulière, concernant les épisodes pluvieux, n'est nécessaire pour mener la comparaison des éléments hydrologiques.

### 3.2.2 Comportement des bassins

La distribution des coefficients d'écoulements calculés pour les diverses unités hydrologiques est représentée dans la figure 3.2.

Les répartitions des coefficients d'écoulements des bassins des Gohards et de Rezé sont semblables, à une translation près de 5% des coefficients d'écoulement. La très grande majorité de coefficients est inférieure au coefficient d'imperméabilisation des bassins. Très peu d'évènements restituent plus de la moitié des précipitations. Les valeurs centrales valent 22% sur Rezé et 28% sur les Gohards.

Les coefficients d'écoulements des surfaces individuelles sont bien plus élevés que ceux des bassins versants. La distribution des coefficients d'écoulement des toits s'apparente à une courbe de Gauss centrée sur 82%. Rares sont les évènements qui restituent moins de 50% des précipitations. Quelques évènements ont un coefficient supérieur à 100%, ces valeurs s'expliquent par les écarts d'estimation des précipitations liés à l'angle d'exposition des surfaces. La répartition des coefficients des chaussées est plus complexe. Deux tendances sont marquées, les évènements qui ne génèrent pas de ruissellement et ceux qui ruissellent comme les toits (module à 80%), les comportements intermédiaires existent à fréquence équivalente mais largement inférieure aux situations extrêmes.

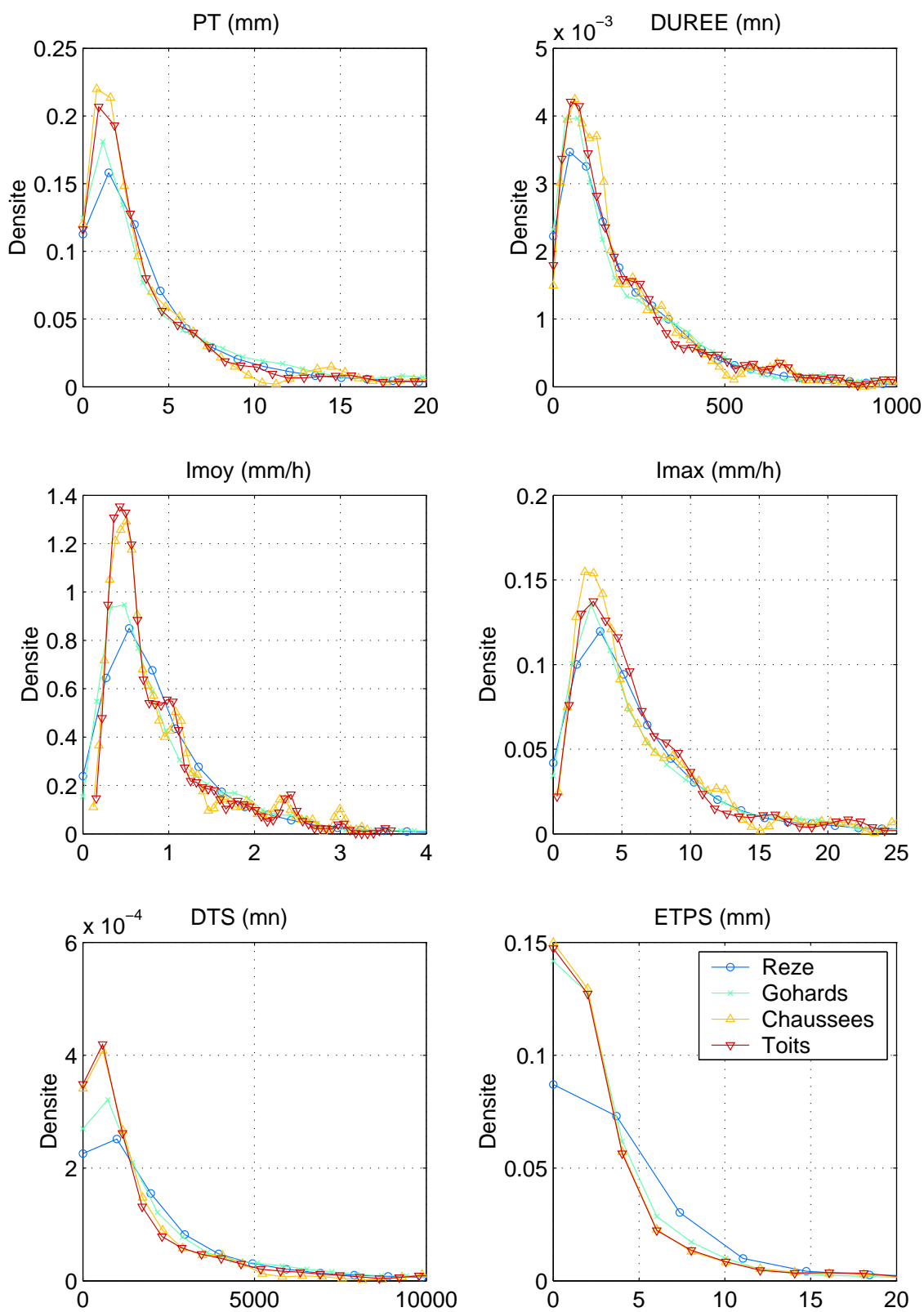
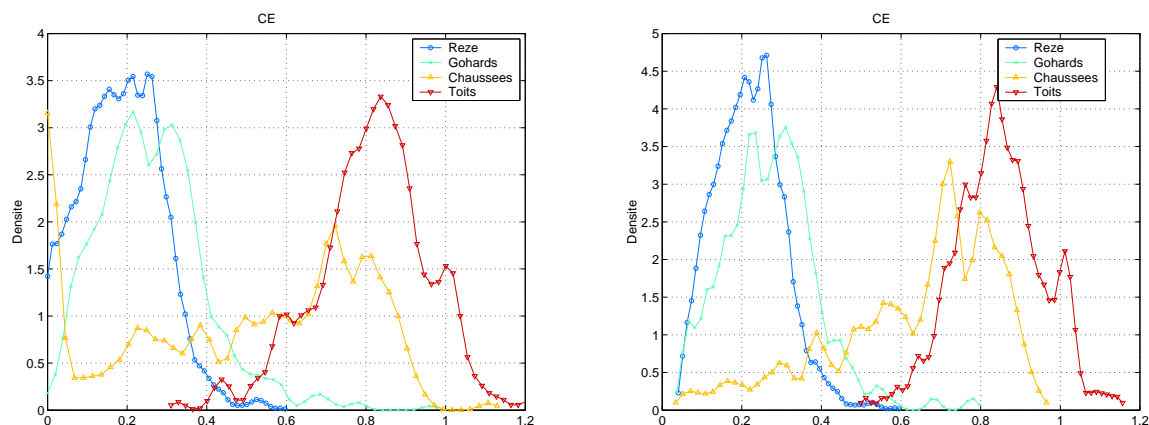


FIG. 3.1 – Distribution des caractéristiques des épisodes



a) Distribution pour l'ensemble des évènements    b) Distribution pour les évènements majeurs

FIG. 3.2 – Coefficients d'écoulement des différents éléments hydrologiques

Le toits diffèrent donc des autres structures par leur absence de pertes initiales. Ils peuvent être considérés comme de véritables surfaces imperméables. Les autres structures sont capables d'infiltrer et de perdre une quantité variable de précipitations.

### 3.2.3 Caractérisations des pertes initiales

S'il n'explique pas la variabilité des coefficients d'écoulement, le modèle urbain classique fournit une première évaluation du coefficient de ruissellement ainsi que l'ordre de grandeur des pertes initiales. Les résultats obtenus avec ce modèle sont données dans le tableau 3.1.

En ce qui concerne les ordres de grandeur de  $CR$ , on retrouve les observations faites sur les coefficients d'écoulement. Il apparaît que les pertes initiales estimées sur les chaussées et les bassins sont proches du millimètre, la valeur pour les toits est bien inférieure.

La distribution des caractéristiques des évènements ne donnant pas lieu à un écoulement est définie par :

- des hauteurs de précipitations inférieure à  $1,5mm$ , la tendance centrale avoisine  $0,75mm$
- une intensité pluvieuse moyenne inférieure à  $0,5mm/h$ , la tendance centrale avoisine  $0,25mm/h$

TAB. 3.1 – Résultats du modèle des pertes initiales simples et coefficient de ruissellement constant

Élément hydrologique	$PI(mm)$	$CR(\%)$
Bassin de Rezé	1,27	34,5
Bassin des Gohards	0,87	35,1
Chaussées	0,91	67,6
Toits	0,26	88,0

- une intensité de pluie maximale inférieure à  $5\text{mm}/h$ , la tendance centrale avoisine  $2\text{mm}/h$ .

Si l'on supprime les évènements qui satisfont au trois conditions ci dessus et ceux dont la restitution est inférieure à 5%, on conserve 1230 évènements sur Rezé, 333 sur les Gohards, 151 évènements sur les chaussées et 198 sur les toits. La distribution des CE obtenues après retraits des évènements à restitution faible est présenté dans la figure 3.2.

### 3.3 Comparaison des réponses hydrologiques

#### 3.3.1 Comparaison à l'aide du modèle de régression linéaire multiple

Pour comparer le comportement des éléments hydrologiques, différentes méthodes sont envisageable :

1. Établir, pour chaque élément, l'équation de la meilleure combinaison linéaire puis comparer un à un les coefficients des combinaisons.
2. Établir un modèle sur un des éléments, effectuer, à partir de ce modèle, une simulation sur les autres éléments. Ainsi il est possible de comparer la qualité des différents corrélations entre valeurs simulées et valeurs réelles.

Nous avons choisi, ici, de mener la seconde méthode de comparaison pour deux raisons : (i) seul le bassin de Rezé possède suffisamment de données pour construire un modèle robuste, (ii) la comparaison des corrélations entre simulations et observations semble plus explicite.

#### Transposition du modèle de Rezé

Le modèle utilisé pour la comparaison est le modèle décomposé. La méthode de transposition est la suivante :

- Sur chaque élément hydrologique la composante saisonnière est identifiée en réalisant une moyenne mensuelle interannuelle.
- La partie résiduelle des coefficients d'écoulements est alors remplacée par les valeurs obtenues par la relation linéaire entre variables explicatives identifié sur la bassin versant de Rezé. Au cours de cette étape on procède aussi au réajustement de la valeur de stockage  $H_{max}$  utilisée pour la description de l'état hydrique des surfaces.
- Les deux composantes sont additionnées pour reconstituer le coefficient d'écoulement «transposé».

Les corrélations des différentes composantes avec les valeurs observées sont regroupées dans le tableau 3.2 et la figure 3.3.

La corrélation obtenue entre les coefficients d'écoulements réels et ceux issus de la transposition du modèle de Rezé est, en ce qui concerne les toits, inférieure à la corrélation

TAB. 3.2 – Résultats de la transposition du modèle linéaire du bassin de Rezé

		Rezé	Gohards	Chaussées	Toits
Comp. mensuelle	r(%)	42,1	49,0	56,2	53,3
Résidus	r(%)	62,8	34,2	37,3	13,0
Recomposées	r(%)	71,1	59,9	68,1	51,9
	PI(mm)	0,90	1,10	0,75	0,08

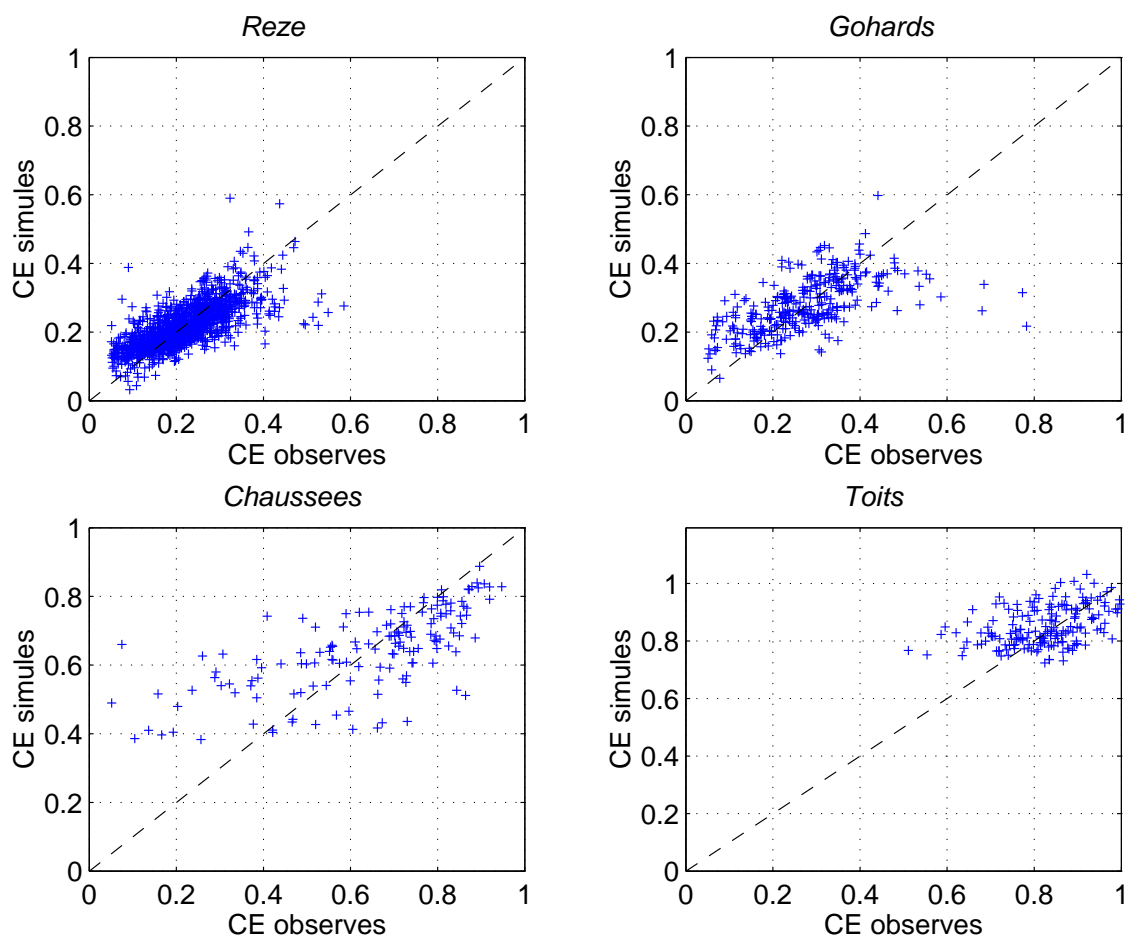


FIG. 3.3 – Transposition du modèle linéaire du bassin de Rezé

TAB. 3.3 – Sélection des variables et significativité sur les différentes unités hydrologiques

Ordre	Rezé	Test(%)	Gohards	Chaussées	Toits
1)	P*	100	EHyd 100	Imoy 100	Durée 100
2)	EHyd	100	Duree 100	EHyd 99,5	Imax 100
3)	Imoy	100	Imoy 94,2	Durée 90,7	Imoy 97,4
4)	DTS	100	DTS 83,7	P* 77,9	EHyd 87,1
5)	Duree	98,9	P* 79,3	Imoy 75,5	DTS 66,9
6)	Imax	53,3	Imax 62,3	DTS 79,9	P* 56,0

observée entre les coefficients d'écoulements et les valeurs saisonnières. Ainsi la variabilité des des valeurs résidus des coefficients sur les toits ne répond pas au même lois que celle identifiée sur le bassin versants de Rezé.

En ce qui concerne le bassin versant des Gohards et les chaussées, le relation linéaire entre coefficient d'écoulement réels et reconstitués par «transposition» est supérieure d'environ 10% à la corrélation entre composantes saisonnière et coefficients d'écoulements réels. Ainsi le modèle de Rezé semble être capable de reproduire une partie de la variabilité des valeurs résiduels sur le bassin des Gohards et les chaussées. Une certaine similarité est mise en évidence en ce qui concerne le comportement des bassins versants urbains et des chaussées.

Si ces structures ont effectivement des comportements proches, alors les variables devraient présenter des significations semblables d'un élément hydrologique à un autre. La comparaison des résultats concernant la sélection des variables sur les bassins versants et les surfaces individuelles devraient nous apporter des éléments de comparaison supplémentaires.

### Signification des variables

La sélection des variables significatives sur les différents éléments hydrologiques donne les résultats présentés dans le tableau 3.3.

Toutes les structures, exceptés les toits, présentent parmi les trois première variables significatives la description de l'état hydrique des éléments hydrologiques (*EHyd*), la description des pluies en quantité (*P\** ou *Duree*) et intensité (*Imoy* ou *Imax*).

Les variables les plus significatives sur les toits caractérisent toute la pluie. Les variables caractérisant les temps sec ou l'influence du climat ( $P^* = PT - ETP$ ) sont rejetées en fin de sélection. Cette configuration traduit bien le caractère ruisselant marqué de ces surfaces.

Ces résultats confortent l'idée selon laquelle :

- d'une part les bassins versants et les chaussées présentent des concepts relativement semblables dans l'explication de la variabilité de leur comportement,



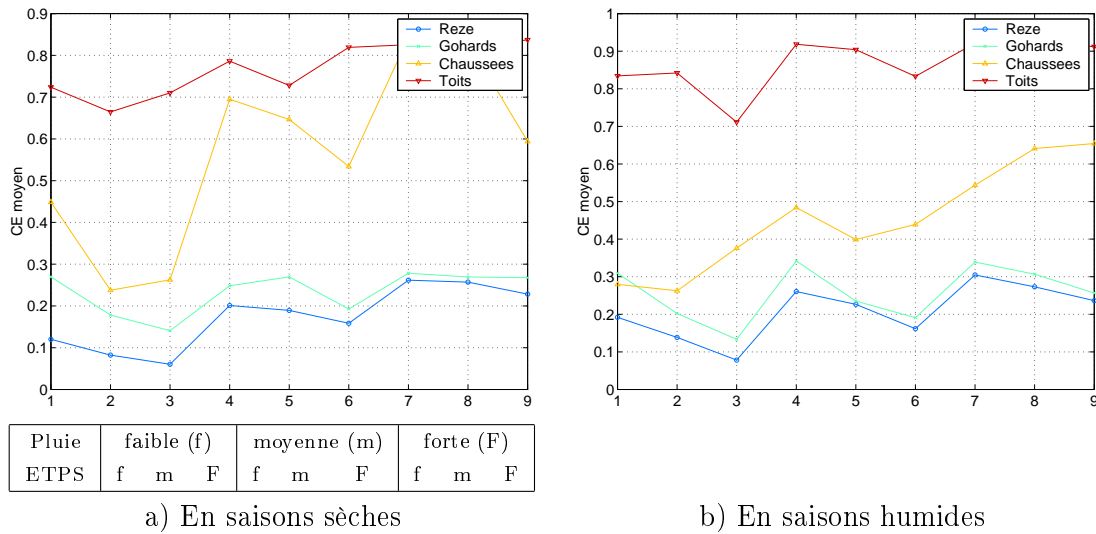


FIG. 3.4 – Comparaison des comportements des familles définie a priori

- d'autre part le comportement des toits est tout à fait singulier des autres éléments hydrologiques.

Il semble l'origine de cette divergence, entre les toits et et le groupe bassins versants chaussées, est à rechercher dans la capacité de stockage d'eau variable des surfaces concernés.

### 3.3.2 Comparaison à l'aide des méthodes de classification

#### Regroupement selon une classification par partition

La méthode de regroupement mise en oeuvre à été décrite au chapitre 2.2. Compte tenu des données disponibles sur les chaussées, pour obtenir des familles représentatives trois paramètres sont retenus :

- un indicateur «saisonnier», identifiant les saisons «sèches» des saisons «humides» ;
- la pluie résiduelle, avec la partition : 0-2mm, 2-5mm et  $P^* > 5mm$ .
- l'évapotranspiration de temps sec, avec la partition : 0-1mm, 1-2mm et  $> 2mm$  ;

54 familles de références sont ainsi formées sur chaque élément hydrologique. Les résultats comportements moyens de chaque familles sont illustrés dans la figure 3.4.

Les familles se comportent de façon similaire sur les deux bassins avec des restitutions toujours un peu plus importantes sur le bassin des Gohards. Les toits présentent une répartition très différente de celle des bassins et chaussées avec une variabilité modérée et des restitutions supérieures à 70%.

#### Regroupement selon les similitudes

##### Principe

La méthode de regroupement est réalisée progressivement par agrégation des évène-

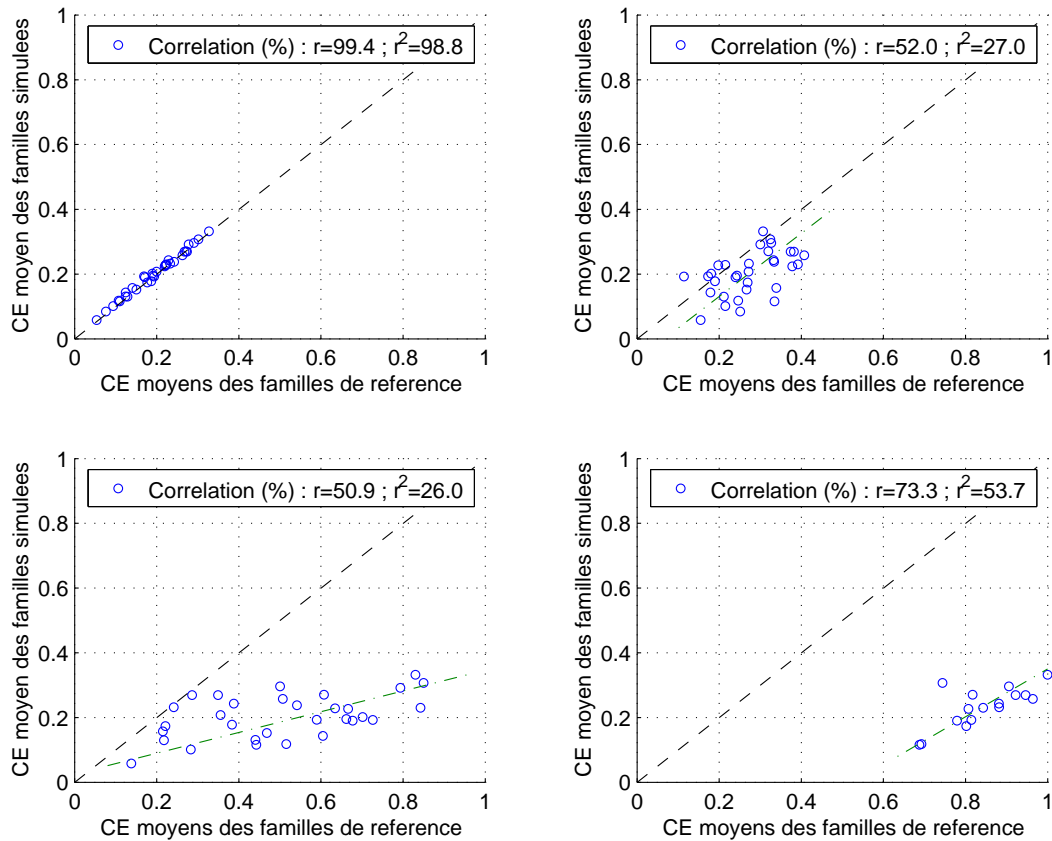


FIG. 3.5 – Comportements, sur les différentes unités hydrologique, des groupes d'évènement similaire. Comparaison au modèle de référence établi sur le bassin de Rezé

a) Rezé b) Les Gohards c) Chaussées d) Toits

ments proches (cf 2.3). Les groupes de référence sont déterminés à partir des données de Rezé selon les critères de saison, de pluie résiduelle, d'état hydrique du sol et d'intensité pluvieuse moyenne. Des coupes successives sont réalisées dans la classification jusqu'à ce qu'on obtienne un maximum de groupes de plus de 15 évènements. Chaque groupe est résumé par :

- un évènement central, *référence* ;
- une *distance critique*, qui majore le distance (référence–évènement) de rattachement au groupe.

Des groupes homogènes sont ainsi constitués sur chaque unité hydrologique. La comparaison est menée en confrontant le coefficient d'écoulement moyen défini sur les groupes des unités hydrologiques. La comparaison du modèle réalisé sur le bassin de Rezé avec les autres unités est illustrée dans la figure 3.5.

## Résultats

Les comportements des deux bassins versants sont assez proches. Le comportement du bassin des Gohards peut être schématisé en ajoutant la valeur de 5% au coefficient

donnés par les familles de Rezé,  $CE_{Gohards} \simeq CE_{Reze} + 5\% + \varepsilon$ . Notons cependant que la dispersion autour de cette tendance est prononcée, la corrélation entre les deux séries avoisine seulement 50%.

Le les évènement de références du bassin de Rezé et des chaussées présente une tendance linéaire marquée avec une pente inférieure à un. Ceci laisse penser que le comportement des chaussées pourrait être approché en corrigeant le coefficient d'écoulement du bassin de référence d'un facteur multiplicatif constant,  $CE_{Chaussees} \simeq CE_{Reze} * b + \varepsilon$  avec  $b > 1$ .

Une tendance linéaire se dessine aussi sur le nuage de point relatif au toit. Cette tendance linéaire présente une pente proche de celle du bassin de référence. Le comportement des toits peut alors être résumé grossièrement selon le relation  $CE_{Toits} = CE_{Reze} + Cste + \varepsilon$ .

Les relations définies à partir des comportements des groupes d'évènements nous amène à s'interroger sur la capacité des surfaces individuelles à expliquer le comportement global d'un bassin urbain. En d'autre terme, la restitution d'un bassin urbain est elle globalement expliquée par les restitués des différentes surfaces individuelles connectées au réseau sur ce bassin ?

### 3.4 Relation entre les bassins et leurs éléments structuraux

En milieu urbain, un bassin versant est constitué par la combinaison de divers éléments hydrologique :

- les surfaces naturelles, dont la contribution est souvent négligée puisqu'elle ne sont pas raccordées au réseau d'eau pluvial,
- les surfaces imperméabilisées représentées par les chaussées, trottoirs, parkings, terrasses...
- les surfaces bâties recouvertes par des toits.

Toutes ces surfaces contribuent plus ou moins directement au débits dans le réseau selon qu'elles y sont directement connectées ou qu'elle le rejoignent indirectement (infiltration, ruissellement vers des surfaces connectées...)

On considère généralement que l'essentiel des volumes rejoignant les réseaux est issu des surfaces imperméabilisées.

Afin de vérifier cette hypothèse, nous allons reconstituer les restitutions des bassins des Gohards de Rezé à partir des schémas de comportements identifiés sur les surfaces revêtues individuelles. Le coefficient d'écoulement des bassins est estimé selon elon la formule :

$$CE_{Bassin} = CE_{Chaussees} \times \frac{S_{Chaussees}}{S_{Bassin}} + CE_{Toits} \times \frac{S_{Toits}}{S_{Bassin}}$$

L'évaluation des surfaces revêtues d'un bassin n'est pas évidente. Les surfaces retenues ici sont extraites des banques de données cadastrales (M.Lechat, 1999). Les rapport de surfaces sont donnés dan le tableau refods.

TAB. 3.4 – Occupation du sol des bassins de Rezé et des Gohards

Bassin Versant	Surface de voirie	Surface de bâti
Rezé	15,7%	17,2%
Les Gohards	16,1%	14,4%

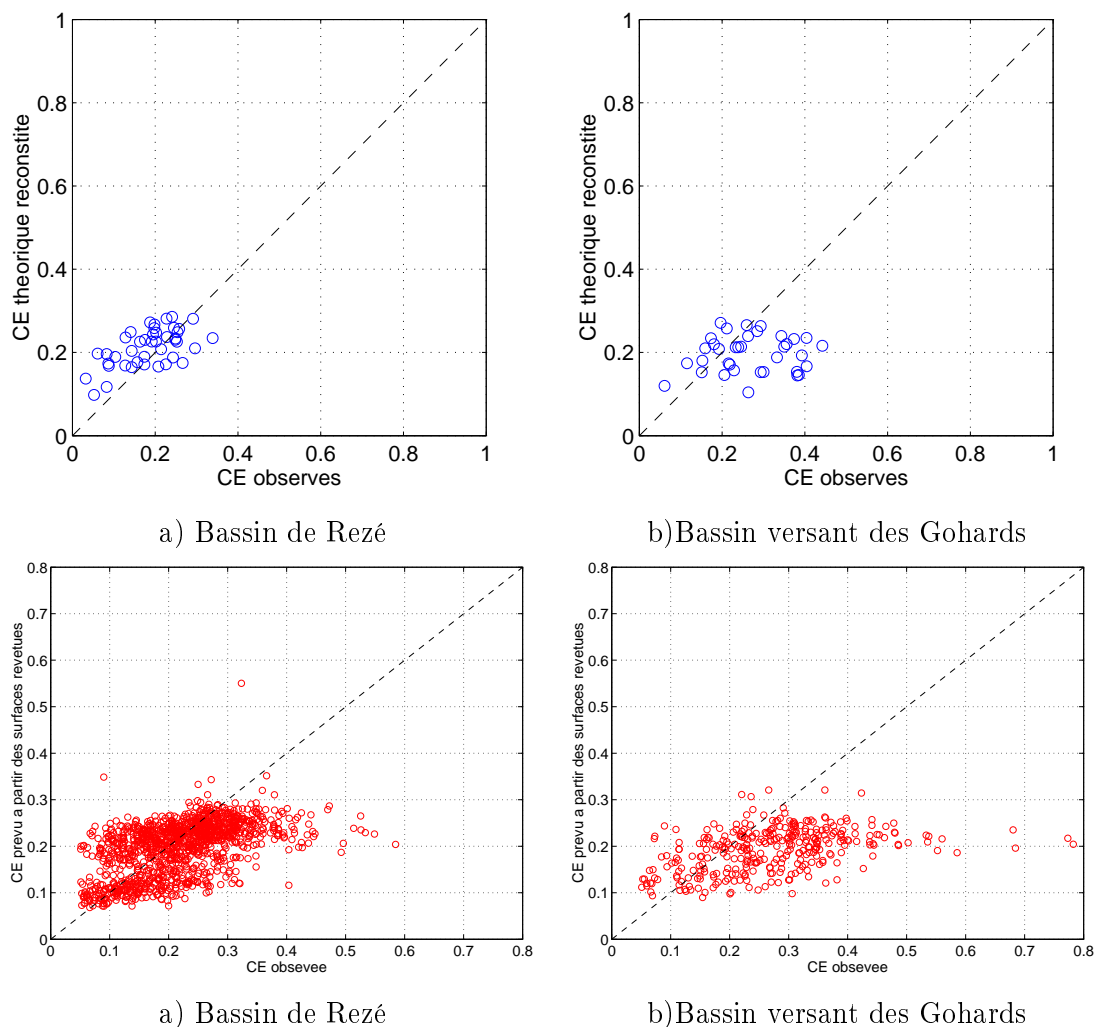
La reconstitutions des comportements des bassins est effectuée avec les modèles linéaires et les modèles issues des regroupements de la classification hiérarchique.

Les modèles linéaires sont réalisés à partir des données décomposées. Les variables utilisées sont l'état hydrique du sol, la pluie résiduelle, les intensités pluvieuses, les durées de pluie et de temps sec. Les modèles de la classification hiérarchique sont identiques à ceux de la section précédente.

Les reconstitutions des coefficients d'écoulements théorique et leur corrélation avec les valeurs observées sont illustrées dans la figure 3.6

L'interprétation des résultats obtenus par les modèle de régression linéaire est délicate. En effet la reconstitution est obtenu à partir de modèles qui n'expliquent pas entièrement la variabilité des comportements des éléments structurels et dont la robustesse est limitée compte tenu du nombre d'évènements disponibles sur ces surfaces. La valeur finalement reconstituée est sujette à de nombreuses incertitudes. Cependant on remarque qu'une certaine proportion de coefficient sont relativement bien reproduis (principalement sur Rezé). Les coefficients les moins bien reconstitués correspondent aux valeurs extrêmes, valeurs qui sont les moins bien reproduites par le modèle linéaire. Les coefficient de corrélations

Les reconstitutions obtenues avec le modèle de classification hiérarchique sont relativement bonnes, la corrélation entre références des coefficients d'écoulements observés et les références des coefficients reconstitués est très forte en ce qui concerne Rezé. Il semble donc que la variabilité de comportement du bassin de Rezé trouve son explication dans le comportement des surfaces revêtues le constituant. Ce constat est moins prononcé sur le bassin des Gohards, cependant les ordres de grandeurs des valeurs restent respectées, ainsi, si sur ce bassin la variabilité de comportement est influencé par d'autres composantes, il n'en reste pas moins que l'essentiel du volume restitués semble expliqué par ces surfaces.



Selon le modèle de classification hiérarchique a, b. Selon le modèle de régression linéaire multiple c, d.

FIG. 3.6 – Coefficients d'écoulement théorique des bassins urbains de Rezé et des Gohards reconstitués à partir des contributions des surfaces individuelles.

## Conclusion

Pour répondre aux exigences de qualité des eaux pluviales, il faut être capable de prévoir le comportement hydrologique des bassins versants urbains lorsqu'ils sont soumis aussi bien à des événements exceptionnelles qu'au événements courants. Le comportement hydrologique d'un bassin versant urbain résumé par le coefficient d'écoulement présente des variations significatives d'un événement pluvieux à un autre. L'étude statistique menée sur le bassin versant expérimental de Rezé met en évidence l'origine principalement hydrométéorologique de cette variabilité. En effet 50% de la variabilité du coefficient d'écoulement s'explique par les 4 paramètres suivants :

- l'état hydrique des surfaces (approximation simple de l'état de saturation des surfaces et des sols)
- l'intensité moyenne de précipitations lors de l'évènement,
- la hauteur de pluie précipitée,
- une variable relative à l'alternance des saison sèches et humides dont les modes de contrôles restent à définir (niveau de la nappe, saturation des sols ...).

Les méthodes statistiques de classification des événements confirment ces résultats, avec le même jeu réduit de variables, elle expliquent une quantité similaire ou légèrement supérieure de variabilité. Ces résultats sont de plus robustesse, qu'ils s'appuient sur des relations linéaires ou libres entre les variables.

Cependant ce modèle n'est validé que sur le bassin expérimental de Rezé. Observe-t-on les mêmes relations sur d'autres bassins versants urbains ou bien ces relations sont elles propres à ce bassin expérimental. Si ces relations semblent se conserver en partie d'un bassin versant à un autre quels éléments constituent le support physique commun de ces relations sur les différents bassin : les surfaces naturelles, les surfaces revêtues ... ?

La transposition des modèles déterminés sur Rezé aux autres unités hydrologiques suivis par le LCPC nous amène aux conclusions suivantes : (i) la cohérence de comportement des bassins de Rezé et des Gohards (10 fois plus grand), confirme le rôle majeur joué par les variables précédemment citées dans l'explication de la variabilité du comportement hydrologiques des bassins versants urbains, (ii) le comportement des chaussées présente une forte variabilité qui n'est pas étrangère à celle des bassins versants. Les résultats obtenus par reconstitutions du comportement théorique des bassins à partir des modèles de comportements des surfaces revêtues individuelles indique que l'essentiel des volumes mise en jeu pour l'écoulement est expliqué par les surfaces de voirie et bâti. La variabilité du comportement complexe des chaussées semble être à l'origine de la variabilité du comportement des bassin versants urbains.

## Annexe A

# Evaporation, Transpiration ...

(Réméniéras, 1999)

Les phénomènes d'évaporation interviennent dans le cycle hydrologique au moment où les précipitations atteignent la surface du sol<sup>1</sup>. L'évaporation se fait d'abord à partir de l'eau de pluie qui ruisselle sur la surface du sol avant de s'infiltrer ou de rejoindre les réseaux. L'eau s'évapore aussi sur des surfaces d'eau stagnantes ou courantes : flaques, mares, étangs, lacs, ruisseaux, rivières et fleuves. Enfin l'eau qui imprègne les couches superficielles du terrain soit qu'elle provienne des pluies récentes ou qu'elle remonte par capillarité de la nappe constitue un aliment important pour l'évaporation.

### A.1 Définitions

L'*évaporation* désigne l'ensemble des phénomènes qui transforment, l'eau en vapeur par un processus *physique*. De grandes quantités d'eau sont évaporées par les plantes qui vont puiser l'eau dans la profondeur du sol l'eau nécessaire à leur développement ; cette évaporation «*biologique*» est appelée «*transpiration*». On groupe sous le nom d'*évapotranspiration* l'ensemble des processus d'évaporation et de transpiration.

Les facteurs qui conditionnent le taux d'évaporation peuvent être groupés en deux catégories bien distinctes suivant qu'ils sont proposés à l'atmosphère ambiante ou à la surface évaporante elle-même.

1. Les paramètres caractérisant l'état de l'atmosphère au voisinage de la surface évaporante et son aptitude à provoquer l'évaporation, ces paramètres régissent le pouvoir évaporant de l'atmosphère (évapotranspiration potentielle).

---

<sup>1</sup>L'évaporation intervient, souvent activement, au cours du trajet de la pluie entre le nuage et le sol, mais la quantité d'eau évaporée n'intervient pas dans les calculs puisque les pluviomètres mesurent les précipitations au sol.

2. Les paramètres caractérisant la nature et l'état de la surface évaporante ainsi que son aptitude à alimenter l'évaporation et à répondre plus ou moins rapidement aux variations du pouvoir évaporant de l'atmosphère.

Les diverses surfaces évaporantes sont influencées de façon quelque peu différente par les variations du pouvoir évaporant de l'atmosphère, en première approximation ce dernier peut être considéré comme un facteur commun à toutes les phénomènes d'évaporation.

Le pouvoir évaporant de l'atmosphère se rattache à la notion «d'évapotranspiration potentielle» d'un bassin versant introduite par Thornthwaite, qui désigne ainsi la hauteur d'eau qui serait effectivement évaporée si les ressources en eau mobilisables dans le bassin étaient à chaque instant au moins égales à celles qui peuvent être transformées en vapeur par le jeu des facteurs hydrométéorologiques et de la végétation. Diverses tentatives ont été faites pour relier le pouvoir évaporant de l'atmosphère à divers facteurs comme :

- Le déficit hygrométrique ou déficit de saturation de l'atmosphère.
- La température de l'air
- L'insolation.
- La vitesse et la turbulence du vent.
- La pression barométrique.

Depuis une vingtaine d'années divers «modèles» mathématiques ou physiques ont été proposés pour analyser le processus d'évaporation d'une surface humide. Certains visent à calculer, à partir d'un bilan thermique, le flux de chaleur  $Q_e$  absorbé par l'évaporation, tandis que d'autres tendent à déterminer directement, d'après les équations de la mécanique des fluides, le flux de vapeur d'eau émis  $E$  ; ces deux quantités sont évidemment liées par la relation  $Q_e = LE$  où  $L$  désigne la chaleur latente de vaporisation de l'eau à la température considérée.

## A.2 Bilan calorifique au niveau de la surface évaporante

Nous nous intéressons ici à établir un «bilan vertical» simplifié des transformations d'énergie, en supposant que l'épaisseur de la couche évaporante est voisine de zéro et que les apports par advection sont négligeables. Ce bilan des flux calorifiques en jeu peut être synthétisé par l'équation suivante :

$$R_n = S + A + E$$

$R_n$  est l'intensité du rayonnement solaire «net» reçu ( $cal/cm^2/min$ ).

$S$  est l'intensité de flux de chaleur émis ou absorbé par le sol ( $cal/cm^2/min$ ). Il résulte surtout des variations du stock de calories accumulées par ce dernier (terme de stockage).

$A$  est l'intensité du flux de chaleur *sensible*, échangé, surtout par convection, avec l'air ambiant ( $cal/cm^2/min$ ).  $E$  est l'intensité du flux de chaleur «latente» correspondant à l'évaporation ( $cal/cm^2/min$ ).

En pratique, le problème du calcul de l'évaporation  $E$  à partir de l'équation ci dessus réside dans la mesure ou l'estimation des termes autres que  $E$ .



### A.3 Formule de Penman

Penman a tenté d'obtenir d'une estimation indirecte du terme A du bilan calorifique «vertical». Vers 1949 il proposait pour le calcul de l'évapotranspiration réelle d'une surface cultivée, une procédure comportant deux phases :

1. *Le calcul de l'évaporation* « $ETp_0$ » d'une hypothétique nappe d'eau libre, peu profonde à partir des éléments météorologiques mesurés suivants :
  - radiation globale reçue,
  - albedo de la surface,
  - gradient de la courbe donnant la tension de vapeur saturante de l'eau en fonction de la température,
  - vitesse du vent.
2. *La conversion de l'évapotranspiration potentielle* « $ETp_0$ » ainsi calculée en évapotranspiration réelle « $ETr$ » de la surface cultivée par le jeu d'un coefficient de réduction « $f$ » donné par l'expérience et variable selon le lieu, le mois et le type de culture.

Vers 1956, l'expérience a montré que le calcul de l'évapotranspiration en deux phases, comme il est indiqué plus haut, n'était pas nécessaire. Ainsi la formule de Penman donnant l'évaporation d'une nappe d'eau libre de faible profondeur, s'écrit :

$$E = 0,22 \cdot 10^{-3} (q_s - q) (0,93 + u_2)$$

$E$  est l'évaporation en  $kg/m^2/j$ ,

$q_s$  la concentration massique ou taux d'humidité (nombre sans dimension) en vapeur d'eau dans l'air, lorsque celui-ci est saturé à la température de l'eau,

$q$  la concentration massique en vapeur d'eau dans l'air mesurée au-dessus de la surface évaporante,

$u_2$  est la vitesse du vent (en mètre par seconde) mesurée à  $2m$  au-dessus de la surface évaporante.

# Bibliographie

- 2000 . *Matlab User's Guide*. The MathWorks, Inc.
- B.Chocat 1997 . Encyclopédie del'hydrologie urbaine et de l'assainissement. Paris : Lavoisier.
- E.Berthier 1999 . *Contribution à une modélisation hydrologique à base physique en milieu urbain. Elaboration du modèle et première évaluation* PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- E.Berthier, F.Rodriguez, H.Andrieu et G.Raimbault 2001 . Les limites du schéma des pertes initiales et coefficient de ruissellement pour la simulation des événements pluvieux courants. *Novatech* **2**, 869–876.
- F.Rodriguez 1999 . *Intérêt des banques de données urbaines pour l'hydrologie. Détermination des fonctions de transfert de bassins versants urbains* PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- G.Saporta 1990 . Probabilités, analyse des données et statistique. Technip.
- L.Guilloteau 2001 . Etude du comportement hydrologique de surfaces revêtues urbaines. LCPC Nantes.
- M.Lechat 1999 . Estimation de la pluie nette par inversion de la fonction de transfert. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- Réménieras, G. 1999 . L'hydrologie de l'ingénieur. Eyrolles.
-

## Annexe B

# Selection des événements pluvieux

...

Cette annexe contient une présentation de la méthode de l'identification des événements pluvieux. La méthode d'identification présentée doit pouvoir s'adapter à de nombreuses études hydrologiques mais du fait de cette adaptabilité, elle est fortement paramétrée.

Pratiquement l'identification d'un événement pluvieux à partir de la série des précipitations à un pas de temps fixe comporte cinq étapes successives.

La première étape est l'identification de la partie centrale. Le premier test de la méthode porte sur une intensité minimum d'existence d'évènement  $I_{min}$ . La série des précipitations est parcourue et si l'intensité dépasse ce seuil  $I_{min}$ , alors un évènement est susceptible d'exister ces limites doivent être déterminées.

La seconde étape est l'identification de la fin de l'évènement. On définit une durée test  $DT_{fin}$ . Si durant cette durée l'intensité reste constamment inférieure à un seuil  $I_{fin}$  et si la hauteur d'eau cumulée précipitée ne dépasse pas un seuil  $H_{fin}$  alors la fin de l'évènement est identifiée. Si ces conditions ne sont réalisées on réitère le test en incrémentant d'un pas de temps le commencement de la durée test précédente. Le processus d'incrémentatation est de test est réitéré jusqu'à ce que les conditions soient satisfaites.

La troisième étape consiste à identifier le début d l'évènement, à partir du début temporaire défini à l'étape 1. Le méthode d'identification est la même que pour l'identification de la fin de l'évènement. Les seuils sont  $DT_{deb}$ ,  $I_{deb}$ ,  $H_{deb}$ . Tant que la condition n'est pas réalisée la période de test est translatée au pas de temps précédent.

La quatrième étape consiste à vérifier que la hauteur d'eau précipitée au cours de l'évènement ainsi définie est suffisamment importante pour donner lieu à un évènement significatif minoré par une hauteur  $H_T$ .

La cinquième étape est de nature un peu différente car elle concerne la série des débits. Cette étape consiste à identifier la fin de la restitution correspondant à l'évènement. Selon

les bassin cette période à lieu plus ou moins longtemps après la fin de l'évènement selon le temps de concentration du bassin et les caractéristiques de la fonction de transfert. La fin de la restitution est observée lorsque pendant une durée test  $DT_Q$ , le cumul des variations de débits entre chaque pas de temps est inférieur à un seuil correspondant à une hauteur d'eau écoulée  $H_Q$ . La période de test de stabilisation des débits à pour origine la fin de l'évènement pluvieux, cette période est décalée d'un pas de temps jusqu' à ce que les conditions de stabilité soient réalisées. Une fois la fin de restitution identifiée, la fin de l'évènement pluvieux ( $DT_{fin}$ ) est identifiée par le pas de temps initiant la période  $DT_Q$ .

Il faut porter une attention toute particulière à la valeur des paramètres. En particulier deux évènements successifs ( $i$  et  $i+1$ ) doivent être suffisamment éloignés l'un de l'autre, c'est à dire  $DT_{fin}(i) < DT_{deb}(i+1)$ . Si cette condition n'est pas réalisée les deux évènements sont regroupés.

# Bibliographie

- 2000 . *Matlab User's Guide*. The MathWorks, Inc.
- B.Chocat 1997 . Encyclopédie del'hydrologie urbaine et de l'assainissement. Paris : Lavoisier.
- E.Berthier 1999 . *Contribution à une modélisation hydrologique à base physique en milieu urbain. Elaboration du modèle et première évaluation* PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- E.Berthier, F.Rodriguez, H.Andrieu et G.Raimbault 2001 . Les limites du schéma des pertes initiales et coefficient de ruissellement pour la simulation des événements pluvieux courants. *Novatech* **2**, 869–876.
- F.Rodriguez 1999 . *Intérêt des banques de données urbaines pour l'hydrologie. Détermination des fonctions de transfert de bassins versants urbains* PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- G.Saporta 1990 . Probabilités, analyse des données et statistique. Technip.
- L.Guilloteau 2001 . Etude du comportement hydrologique de surfaces revêtues urbaines. LCPC Nantes.
- M.Lechat 1999 . Estimation de la pluie nette par inversion de la fonction de transfert. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- Réménieras, G. 1999 . L'hydrologie de l'ingénieur. Eyrolles.
-