

Recherche d'un modèle de pluie de projet adapté aux précipitations de la zone tropicale africaine

Cas d'Adiopodoumé — Abidjan (Côte d'Ivoire)

Daniel SIGHOMNOU (1) et Michel DESBORDES (2)

RÉSUMÉ

La structure de 190 épisodes pluvieux enregistrés en 16 ans à la station d'Adiopodoumé est analysée. Les résultats de cette analyse révèlent que les techniques de construction des pluies de projet proposées par DESBORDES d'une part et par HUFF d'autre part s'adaptent bien au cas d'Adiopodoumé. Cette adéquation est mise en évidence par la comparaison entre des hydrogrammes provoqués par des pluies aux caractéristiques connues enregistrés sur des bassins versants voisins, et ceux calculés à l'aide des pluies de projet type DESBORDES et HUFF de mêmes caractéristiques.

MOTS-CLÉS: Episodes pluvieux — Pluie de projet — Afrique tropicale — Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

DESIGN STORM MODELLING ADAPTED TO TROPICAL AFRICA: THE EXAMPLE OF ADIOPODOUMÉ — ABIDJAN (IVORY COAST)

The structure of 190 storm events recorded over a period of 16 years at Adiopodoumé is analysed. A subsequent comparison of the observed hydrographs resulting from storms of known characteristics, recorded in nearby drainage basins, and those calculated from DESBORDES and HUFF-type design storms of similar characteristics, shows that the methods proposed by the two authors give comparable results at Adiopodoumé.

KEY WORDS: Storm event — Design storm — Tropical Africa — Ivory Coast.

1. INTRODUCTION

Le dimensionnement des réseaux d'assainissement pluvial en zone urbaine se fait au moyen de méthodes très diverses, dont les plus performantes sont les méthodes dites « complètes », procédant à une simulation généralisée du phénomène pluie-ruissellement. Quelle que soit la méthode utilisée, une connaissance assez précise et détaillée des caractéristiques des averses locales est une condition essentielle pour arriver à des résultats fiables.

Les épisodes pluvieux sont des phénomènes aléatoires, à la structure très complexe et difficilement reproductible. Le dimensionnement des ouvrages pour se prémunir contre des dégâts qu'occasionnerait un événement de fréquence donnée devrait donc se faire en termes de risque de défaillance. Ceci nécessite la possibilité d'associer une probabilité à un événement donné. Or à la limite, chaque épisode pluvieux est unique dans son genre, et on ne saurait lui affecter une probabilité d'occurrence précise.

Malgré cette difficulté certains hydrologues ont tenté de mettre au point, à l'usage des projeteurs, des hyétogrammes synthétiques appelés « pluies de projet », dont la transformation conduit à des paramètres de ruissellement pour lesquels on peut chiffrer la probabilité d'occurrence en tout point du bassin versant et de son réseau.

L'élaboration de telles pluies repose sur l'analyse statistique de divers éléments (hauteur, durée, forme) des épisodes pluvieux. Plusieurs techniques de construction ont été proposées. Ce sont les méthodes de KEIFER (1957), de NORMAND (1970), de DESBORDES (1974), etc.

(1) Hydrologue, CRH (IRGM), BP 4110 Yaoundé, Cameroun.

(2) Hydrologue, USTL, Place Eugène Bataillon, 34060 Montpellier Cedex 1.

Plusieurs analyses critiques de ces différentes méthodes ont déjà été effectuées, notamment celle de DESBORDES et RAOUS (1980) qui proposent une autre méthode plus élaborée basée sur l'étude de la sensibilité d'un modèle de transformation pluie-débit aux caractéristiques des averses.

Notre objectif est de déterminer la technique de construction la mieux adaptée aux précipitations de l'Afrique tropicale. Nous disposons de 16 années d'enregistrements pluviographiques à la station d'Adiopodoumé et des résultats d'une étude expérimentale de la relation pluie-débit entreprise dans le secteur.

Après avoir procédé à une analyse de la structure des épisodes pluvieux de notre échantillon et construit des hyétogrammes synthétiques types, nous vérifierons au moyen d'un modèle de transformation pluie-débit ajusté sur les bassins observés que ces hyétogrammes conduisent à des résultats satisfaisants.

2. ANALYSE DES DONNÉES ET CONSTRUCTION DE LA PLUIE DE PROJET TYPE DESBORDES

La méthode proposée par DESBORDES et RAOUS est basée sur l'étude de la sensibilité d'un modèle de transformation pluie-débit aux caractéristiques des averses. En effet, l'observation des hydrogrammes enregistrés à l'exutoire des bassins versants montre une bien moindre variabilité de forme que celle des hyétogrammes qui les ont provoqués. Il convenait alors de rechercher les caractéristiques de la pluie dont les variations influent de façon significative sur l'hydrogramme de ruissellement, et de ne s'en tenir qu'à celles-ci. Ces principales caractéristiques déterminées par les deux auteurs sont les suivantes :

- la durée (D_p) de la pluie et l'intensité moyenne associée,
- une période de pluie intense (DM) sur une durée critique pour le bassin,
- la position de cette période intense sur la durée D_p ,
- la forme de la pluie et le pas de temps de discrétisation des intensités.

La figure 1 donne l'allure d'une telle « pluie de projet ».

L'analyse des épisodes pluvieux de notre échantillon nous permettra de déterminer ces différentes caractéristiques et de proposer un modèle de pluie de projet.

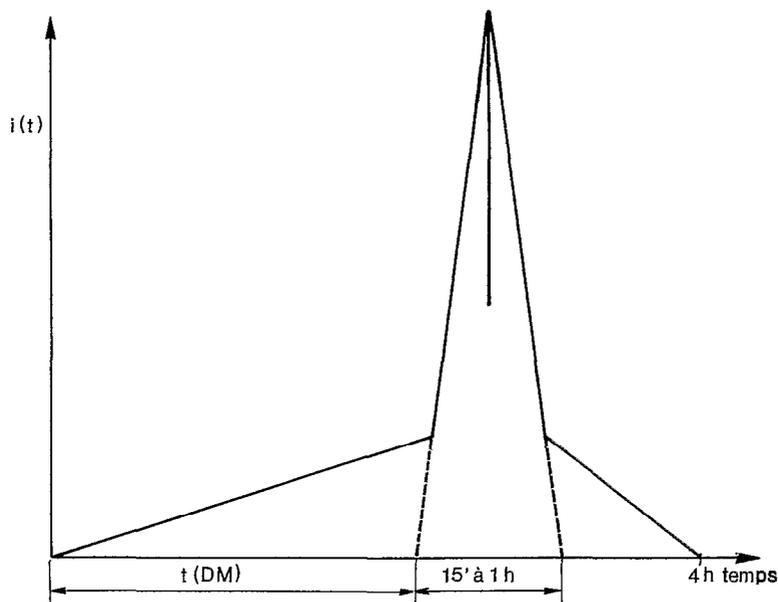


FIG. 1. — Pluie de projet type DESBORDES
(DM est ici représentée par la durée 15' à 1 h)

2.1. PRÉSENTATION DES DONNÉES ET ANALYSE DES RÉSULTATS

Les données à notre disposition portaient sur 16 années de mesures. Pour des raisons pratiques, mais aussi du fait que seules les pluies intenses de quelque importance sont réellement critiques dans le sens de l'assainissement pluvial urbain, le seuil de sélection des épisodes pluvieux a été de 25 mm au moins en 24 heures. Ce seuil de tri peut conduire à éliminer un certain nombre d'épisodes intenses sur de faibles durées, mais l'examen de la série pluviographique nous a montré qu'il y avait très peu d'événements de ce genre.

Nous avons ainsi constitué un échantillon de 190 épisodes pluvieux, en adoptant le critère de séparation de 6 heures au moins sans pluie (temps approximatif nécessaire pour que les grands réseaux urbains se vident), généralement admis en zone urbaine.

Pour l'ensemble des épisodes pluvieux, nous avons procédé aux différentes opérations suivantes :

- calcul de la hauteur totale de la pluie et de sa durée,
- détermination des hauteurs maximales précipitées en 15, 30, 60 et 240 minutes consécutives,
- détermination de la hauteur précipitée avant la période de pluie maximale de 4 h,
- analyse de la distribution des intensités au sein des averses.

Etude de la durée des épisodes pluvieux, recherche d'une durée de référence

Les durées minimale et maximale observées sont respectivement de 25 mn et 19 h 57 mn, pour une durée moyenne de 234 mn, soit environ 4 h.

60% des épisodes ont une durée inférieure à 4 h,

32% une durée comprise entre 4 h et 8 h,

8% une durée supérieure à 8 h.

Pour les averses de durée supérieure à 4 h, 74% des cas sont tels que la hauteur maximale en 4 h représente au moins 80% de la hauteur totale précipitée.

92% des pluies sont telles que la quantité précipitée avant le début de la pluie maximale de 4 h est inférieure à 5 mm. Seuls 11 épisodes sont tels que cette quantité dépasse 10 mm, et donnent lieu à des intensités qui peuvent dépasser 15 mm/h, valeur assez faible par rapport à l'intensité d'infiltration (des surfaces perméables) qui peut atteindre 100 mm/h dans la région (LAFFORGUE et NAAH 1976).

Deux épisodes seulement parmi les 190 sont tels que l'intensité moyenne de la pluie maximale en 4 h soit supérieure à 2 fois l'intensité moyenne sur la durée totale de l'averse. Les intensités restent donc assez soutenues pendant les averses. De ce fait, une durée de référence inférieure à 4 h (compte tenu de la forte proportion (60%) des épisodes de durée inférieure) serait irréaliste, dans la mesure où la quantité précipitée avant le début de la durée de référence peut avoir une influence sur la réponse éventuelle des surfaces perméables. D'autre part, nos analyses ont montré que la hauteur maximale précipitée en 4 h a, en général, une importance relative significative sur la hauteur totale des épisodes pluvieux. On retiendra donc la durée moyenne de 4 h comme durée de référence pour les épisodes critiques au sens du ruissellement pluvial urbain.

Etude des positions des maxima en 15 mn (HM(15)), 30 mn (HM(30)) et 1 h (HM(1 h))

En général, au cours d'une averse, une proportion considérable du total précipité survient pendant une durée très courte au regard de la durée totale de la pluie. Selon que cet instant du maximum est placé au début (pluie avancée), au milieu (pluie centrée) ou à la fin de l'épisode (pluie retardée), on note une influence considérable sur le débit de pointe aux différents points du réseau.

Soit $t(DM)$ le temps écoulé depuis le début de la pluie maximale en 4 h jusqu'au début de la période intense DM (fig. 1); on caractérise la position de la période DM par le rapport :

$$\Theta (DM) = \frac{t (DM)}{4 \text{ h} - DM}$$

qui varie de 0 à 1.

Pour les durées intenses de 15, 30 et 60 mn, nous avons calculé ces rapports, et les résultats répartis par classes d'intervalle 0.1 sont regroupés dans le tableau I.

Pour toutes les trois durées, la probabilité que le paramètre de position θ soit compris entre 0 et 0.1 est supérieure à 0.50, et la distribution uniforme des valeurs n'apparaît que sur l'intervalle (0.4, 1). Le pourcentage des

pluies avancées est donc élevé dans tous les cas. Nous retiendrons la forme de pluie «1/4 avant» (soit $\theta = 0.25$) pour nos pluies de projet (fig. 2), ou à la rigueur, la pluie centrée pour se placer du côté de la sécurité.

TABLEAU I
Répartition des valeurs de $\theta(DM)$ en % (dans l'intervalle 0 à 1)

$\theta(DM)$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
	à	à	à	à	à	à	à	à	à	à
durée	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
15 mn	51.9	18.4	13.0	6.5	2.2	1.1	3.2	2.2	0.54	1.1
30 mn	60.2	14.5	8.1	7.0	1.6	1.6	2.7	2.7	0.54	0.54
60 mn	64.7	12.3	8.6	4.3	2.1	2.1	1.6	2.1	1.1	0.53

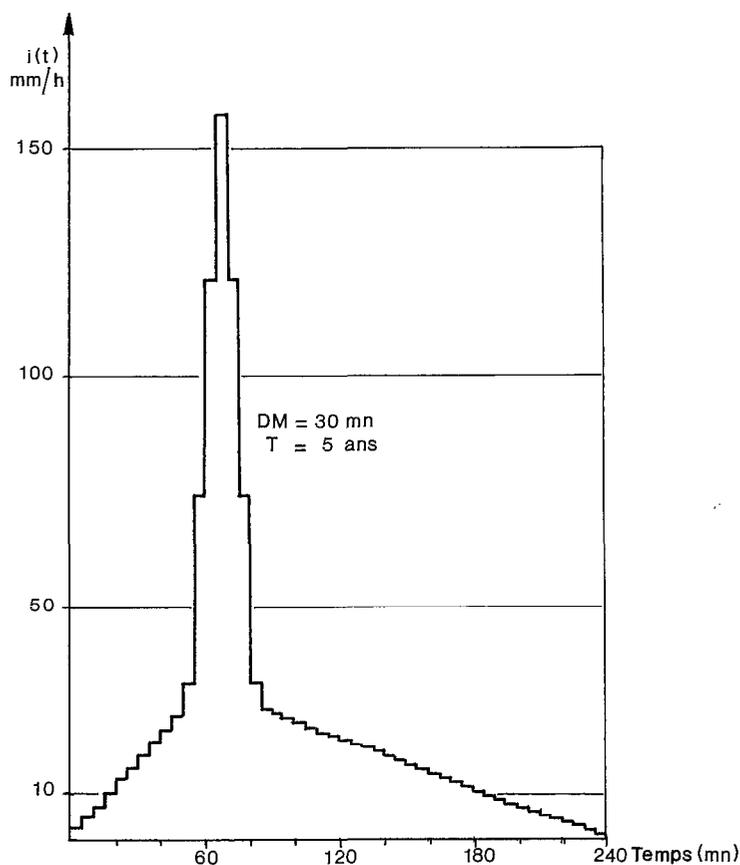


FIG. 2. — Exemple de pluie de projet «1/4 avant» à Adiopodoumé

Etude des liaisons entre les hauteurs $HM(DM)$ et leur complément à 4 heures, $HT(4 h) - HM(DM)$

L'étude des liaisons linéaires entre les hauteurs maximales en 15, 30 et 60 mn et leur complément à 4 h a conduit à des coefficients de corrélation très faibles (25 à 30%). Ceci traduit une absence de liaison entre ces différentes variables, d'où la non-justification des pluies de projet type NORMAND évoquées plus haut.

Dans la pratique, pour construire une pluie de projet de récurrence T années, la hauteur maximale sur la période intense, HM(DM,T), sera déterminée à partir des courbes Idf et la hauteur complémentaire pourra être déduite des observations, à partir des événements pour lesquels HM(DM) a une période de retour de l'ordre de T.

2.2. CONCLUSION

Au regard des diverses analyses effectuées, on peut admettre qu'à la différence près de la position du maximum, la structure de la pluie de projet proposée par DESBORDES et RAOUS à partir des observations faites en France se retrouve dans celles faites à Adiopodoumé.

En nous aidant des résultats de mesures pluie-débit effectuées dans le secteur (SIGHOMNOU D. 1986), nous allons vérifier qu'une telle pluie conduit à des résultats satisfaisants. Mais auparavant et pour permettre de faire des comparaisons, nous appliquerons à nos données une autre technique de construction qui nous semble également intéressante.

3. LA MÉTHODE DE HUFF OU LES PLUIES DE PROJET TYPE ISWS

Cette méthode développée par l'Illinois State Water Survey (ISWS) et présentée par HUFF en 1967, consiste à traduire statistiquement la forme des pluies par des diagrammes sans dimension qui donnent l'évolution, du début à la fin de la pluie, de la proportion de hauteur totale précipitée en fonction de la proportion de la durée totale écoulée depuis le début de la pluie.

La méthode peut se traduire par la relation suivante :

$$H(t)/HT = f(t/Dp)$$

avec : H(t) la hauteur totale précipitée à l'instant t,
HT la hauteur totale de la pluie,
t le temps écoulé depuis le début de la pluie,
Dp la durée totale de la pluie.

Quatre types de pluies sont définis selon que la période intense se situe dans le 1^{er}, le 2^e, le 3^e ou le 4^e quart de la pluie.

L'analyse des 190 épisodes enregistrés à Adiopodoumé nous a donné les résultats suivants :

- 98 épisodes (51.6 %) sont du premier quartile,
- 54 épisodes (28.4 %) du deuxième quartile,
- 29 épisodes (15.3 %) du troisième quartile,
- 9 épisodes (4.7 %) du quatrième quartile.

Comme pour la première analyse, la prédominance des pluies avancées est notable.

Les pluies de longue et courte durée sont indifféremment réparties entre les différents groupes. En effet, 53 % des pluies du premier quartile ont une durée inférieure à 4 h, contre respectivement 72, 62 et 44 % pour les pluies du 2^e, 3^e et 4^e quartile.

Compte tenu du faible nombre des épisodes du 4^e quartile, seuls les trois premiers groupes ont été étudiés. Les courbes obtenues sont montrées sur la figure 3. Ces résultats appellent les commentaires suivants : si on considère des pluies du premier quartile de durée 100 minutes, dans 10 % des cas près de 80 % (contre 51 % en moyenne) du volume total vont précipiter pendant les vingt premières minutes, tandis que 95 % précipiteront en 50 minutes contre 80 % en moyenne.

Dans la pratique, après avoir choisi la durée Dp et la période de retour T de l'événement pluviométrique contre lequel on souhaite se prémunir, la hauteur totale précipitée correspondante, (HT(Dp,T)), est déterminée sur les courbes Idf, puis répartie sur Dp conformément aux diagrammes du quartile choisi. Pour chaque quartile, on retiendra la courbe 0.50 pour le type de pluie le plus fréquent.

Nous montrons sur la figure 4 ces formes moyennes pour les trois groupes de pluies. On observe sur cette figure que les intensités les plus fortes sont enregistrées pendant les pluies du premier quartile. Ces pointes d'intensité surviennent en outre au début de l'averse, ce qui conduit, dans le cas d'un réseau vide, à un amortissement des débits de pointe.

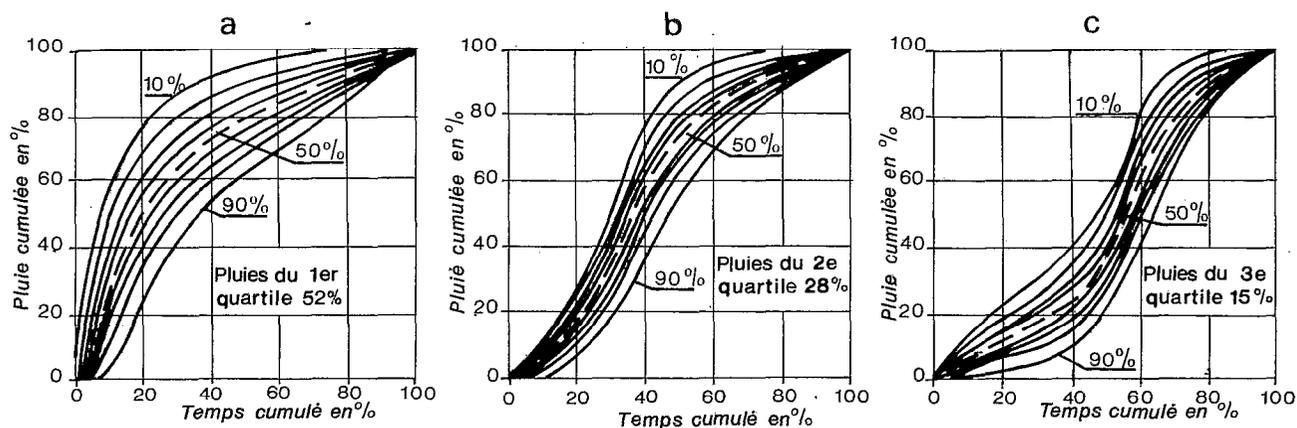


FIG. 3. — a, b, c, — Distribution des volumes précipités en fonction du temps à Adiopodoumé

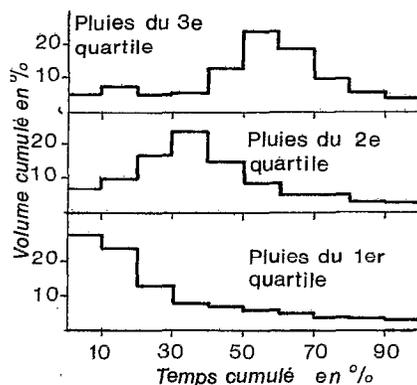


FIG. 4. — Formes moyennes des pluies de différents quartiles

4. COMPARAISON DES HYDROGRAMMES DE FRÉQUENCE CONNUE A CEUX CALCULÉS A PARTIR DES PLUIES DE PROJET

Nous disposons de quelques hydrogrammes provoqués par des pluies de fréquence connue, enregistrés sur des bassins observés à Yopougon, localité située à proximité de la station pluviographique d'Adiopodoumé.

La courbe 0.50 du premier quartile a été utilisée pour construire des pluies de projet type HUFF de durée 4 h, et de même fréquence que celle qui ont provoqué les hydrogrammes ci-dessus, et les pluies « 1/4 avant » de DESBORDES ont également été construites.

Le modèle du réservoir linéaire a été retenu pour la reconstitution des hydrogrammes à partir des pluies de projet. On rappelle qu'il s'agit d'un modèle conceptuel dans lequel le bassin versant est assimilé à un réservoir linéaire dont les variations du stock S sont reliées à l'intensité $i(t)$ de la pluie et $Q(t)$ de la lame ruisselée par la relation:

$$dS(t)/dt = i(t) - Q(t) \tag{1}$$

dans laquelle $Q(t)$ et $i(t)$ sont exprimés en intensité.

La lame ruisselée étant proportionnelle au stock on a:

$$S(t) = K Q(t) \tag{2}$$

d'où l'équation différentielle du processus de transformation:

$$K \frac{dQ(t)}{dt} + Q(t) - i(t) = 0 \quad (3)$$

La solution générale de cette équation est la suivante:

$$Q(t) = Q_0 e^{-(t-t_0)/k} + 1/K \int_{t_0}^t i(u) e^{-(t-u)/k} du + Q_b \quad (4)$$

où Q_b représente le débit de base, Q_0 le débit résultant d'une averse antérieure au temps $t = t_0$ début de la pluie $i(t)$ et K le paramètre du modèle.

L'opérateur de transformation ou hydrogramme unitaire instantané $h(t)$ est le suivant:

$$h(t) = 1/K e^{-t/k} \quad (5)$$

Si au temps $t_0 = 0$, $Q_0 = 0$, la discrétisation de $i(t)$ au pas de temps Δt permet d'écrire l'équation (4) sous la forme explicite suivante:

$$Q(n \Delta t) = e^{-1/k} Q((n-1) \Delta t) + (1 - e^{-1/k}) i(n \Delta t) \quad (6)$$

dans laquelle K est exprimé en unités de pas de temps.

Q et i sont respectivement les débits et intensités moyennes (exprimés en $\text{mm}/\Delta t$) sur chaque pas de temps alors que n représente le numéro du pas de temps.

La figure 5 montre, en comparaison avec les hydrogrammes observés, la transformation de nos hyétogrammes de projet en hydrogrammes de ruissellement à l'exutoire de trois bassins de Yopougon dont les paramètres K ont été déterminés expérimentalement (SICHOMNOU *op. cit.*). Il convient de préciser que les périodes de retour T portées sur les différents diagrammes ont été déterminées en admettant, comme dans la Méthode Rationnelle, que le débit de pointe a la même période de retour que l'intensité moyenne maximale de la pluie qui le provoque.

Les hydrogrammes reconstitués à partir des deux types de pluies de projet sont comparables à ceux provoqués par des pluies observées de même fréquence. Cependant, les débits de pointe donnés par la méthode de DESBORDES sont toujours supérieurs à ceux obtenus pour la pluie de HUFF. Pour les volumes ruisselés, c'est le phénomène inverse.

Ceci viendrait du fait que la méthode de DESBORDES privilégie la période de pluie intense et s'efforce de reconstituer des valeurs d'intensités instantanées assez proches des valeurs observées, alors que la méthode de HUFF prend la moyenne des intensités d'un ensemble de pluies données, ce qui peut conduire à une atténuation marquée des pointes d'intensité.

D'autre part, la méthode de HUFF a l'avantage de présenter les résultats en forme de courbes facilement exploitables et d'affecter une probabilité à chaque forme de pluie, mais nécessite pour chaque cas particulier, de tracer des courbes locales. Par ailleurs HEMAIN (1983) signale des cas où la détermination des diagrammes locaux s'est avérée impossible à cause d'une trop grande dispersion des points interdisant un lissage significatif.

La méthode de DESBORDES est plus facilement généralisable que la précédente. Cependant, elle s'écarte un peu de la réalité quand elle conserve les mêmes caractéristiques de la période intense pour les pluies avancées, centrées ou retardées. En effet, l'analyse de nos données nous a révélé que dans les deux derniers cas les intensités de pointe étaient en général plus faibles. On devrait donc en tenir compte, dans ces cas, pour ne pas aboutir à une surestimation des débits de pointe.

5. PRINCIPES D'APPLICATION DES PLUIES DE PROJET

Suivant les caractéristiques particulières des bassins versants telles que la réponse éventuelle des zones perméables (ou rurales), le stockage ou les amortissements dus au réseau de drainage etc., il est évident que le modèle de pluie de projet critique va varier. L'analyse du système d'assainissement (en place ou en projet) du bassin à étudier à l'aide d'une série de pluies de projet préalablement construites permettra de déterminer la pluie adéquate.

5.1. CONSTRUCTION DES PLUIES DE PROJET TYPE DESBORDES

Pour déterminer la valeur de DM , une estimation grossière préalable du temps de concentration (t_c) du bassin permettra de définir la plage à explorer (en général, $DM < t_c$). Par la suite, plusieurs valeurs de DM seront testées pour déterminer celle conduisant au plus fort débit de pointe. Une fois la valeur de DM connue, on déduira $HM(DM, T)$ des courbes I_{df} ou des formules de MONTANA.

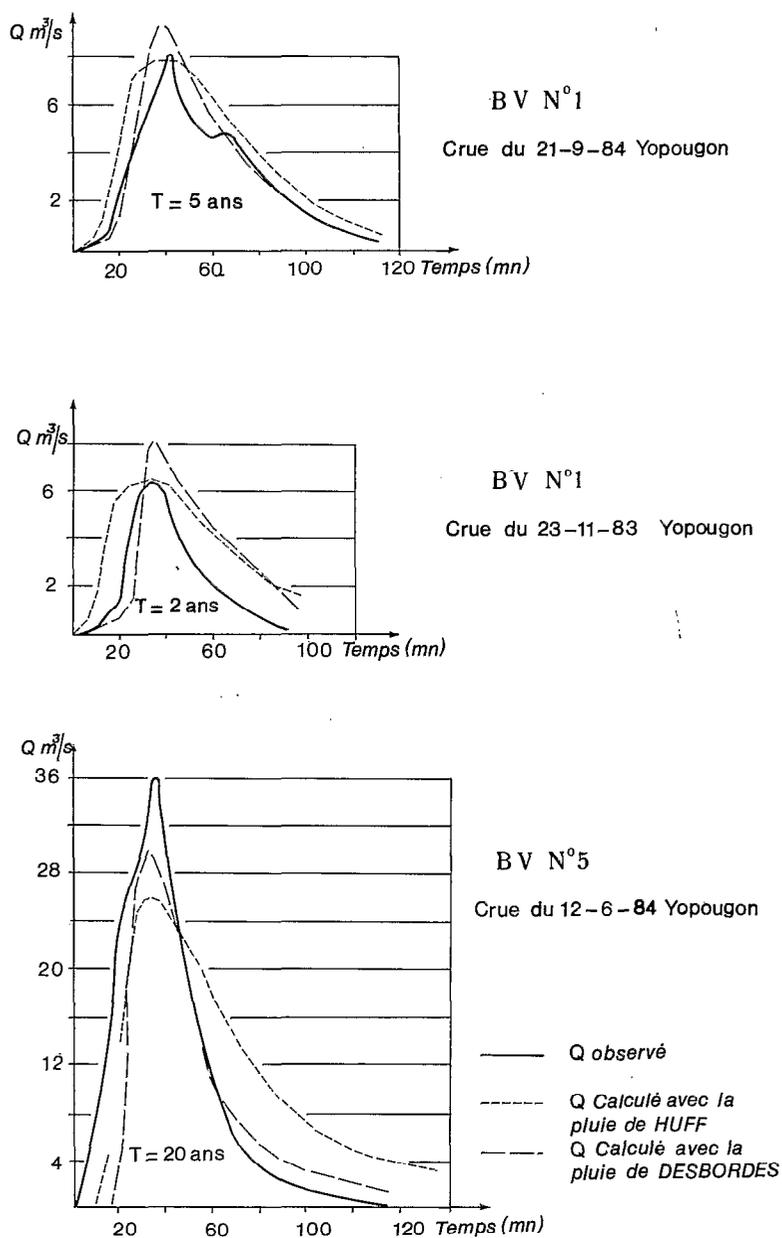


FIG. 5. — Comparaison des hydrogrammes observés et calculés à partir des pluies de projet

La détermination de la valeur complémentaire $HT(4\text{ h})\text{-}HM(\text{DM})$ est assez délicate, mais les études de sensibilité entreprises par DESBORDES (1976) ont montré qu'elle influe très peu sur la valeur du débit de pointe. On peut la déterminer suivant deux procédures:

— soit on ajuste des lois de probabilité sur les observations et on tire au hasard des valeurs dans ces lois pour construire la série de pluies,

— soit on déduit ces valeurs des observations, parmi les épisodes pluvieux tels que $HM(\text{DM})$ soit de période de retour T .

Si une position préférentielle de la période intense est connue, on utilisera ces différents résultats pour construire la série de pluies de projet suivant le modèle de la figure 1, discrétisée sur un pas de temps de 5 mn. Dans le cas contraire, on pourra retenir la position centrale, ou la pluie «3/4 arrière» pour se placer du côté de la sécurité.

5.2. CONSTRUCTION DES PLUIES DE PROJET TYPE HUFF

Après avoir construit les courbes de distribution des volumes précipités en fonction du temps, on déduira la hauteur totale précipitée de durée 4 h (ou plus, dans le cas des aménagements comportant des bassins de retenue) et de période de retour T choisie, des courbes Idf. Cette hauteur sera discrétisée sur un pas de temps de 5 mn, suivant les courbes du quartile regroupant le plus grand nombre d'épisodes pluvieux, pour constituer la série de pluies à tester.

CONCLUSION

Les deux méthodes de construction des pluies de projet proposées par DESBORDES et HUFF conduisent à des résultats satisfaisants pour le cas d'Adiopodoumé. Cependant, afin de pouvoir juger du caractère de généralité de ces méthodes en Afrique tropicale, il conviendrait de réaliser les mêmes analyses sur d'autres stations pluviométriques de la région. Nous envisageons d'entreprendre de telles études pour 5 stations du Cameroun.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 20 mai 1988

BIBLIOGRAPHIE

- DESBORDES (M.), 1974. — Réflexions sur les méthodes de calcul des réseaux urbains d'assainissement pluvial, Thèse de Docteur-Ingénieur, USTL, Montpellier, 224 p.
- DESBORDES (M.), RAOUS (P.), 1976. — Un exemple de l'intérêt des études de sensibilité des modèles hydrologiques, *La Houille Blanche*, n° 1-1976: 37-43.
- DESBORDES (M.), RAOUS (P.), 1980. — Fondement de l'élaboration d'une pluie de projet urbaine: Méthode d'analyse et application à la station de Montpellier-Bel Air, *La Météorologie*, VI^e série, n° 20-21, mars-juin 1980: 317-326.
- HEMAIN (J.-C.), 1983. — Guide de construction et d'utilisation des pluies de projet. Note LHM 24/83, Montpellier, 100 p.
- HEMAIN (J.-C.), RAOUS (P.), 1983. — Méthodologie d'élaboration de pluies de projet adaptées à la Côte d'Ivoire. Note LHM 19/83, Montpellier, 111 p.
- HUFF (F.A.), 1967. — Time Distribution of Rainfall in Heavy Storms. *Water Resources Research*, Vol. 3, n° 4: 1007-1019.
- KEIFER (C.J.), CHU (H.H.), 1957. — Synthetic Storm Pattern for Drainage Design, *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 83, n° HY. 4: 1332-1-1332-25.
- LAFFORGUE (A.), NAAH (E.), 1976. — Exemple d'analyse expérimentale des facteurs de ruissellement sous pluies simulées. *Cah. ORSTOM, série Hydrol.*, Vol. XIII, n° 3: 195-237.
- NORMAND (D.), VEYRAT (P.), RENE (R.), 1970. Etude statistique des hyétogrammes types, DEU, Rapport SOGREA, R. 10 653, 20 p.
- SIGHOMNOU (D.), 1986. — Assainissement pluvial en zone urbaine en Afrique Tropicale. Cas de Yopougon (Côte d'Ivoire), Thèse de Doctorat de 3^e Cycle, USTL, Montpellier, 245 p.