

*Influence des activités de l'homme
sur le cycle hydrométéorologique*

QUESTION IV
RAPPORT 5

ADAPTATION DE LA FORMULE DE CAQUOT AUX RÉGIMES DES RÉGIONS INTERTROPICALES

L. LEMOINE
SOMIVAC, Bastia

et J. CRUETTE
ORSTOM, Paris

Présentation succincte des résultats de mesures effectuées : 1) sur trois bassins versants de la zone urbaine de Niamey, 2) sur le bassin de Makele Kele à Brazzaville, 3) sur le bassin de Mfoundi drainant la ville de Yaoundé. Essai d'adaptation de la formule de Caquot par modification de ses différents coefficients; ajustements proposés pour diverses régions de la Côte d'Ivoire et pour la zone sahélo-soudanaïenne. Recherche d'une formule mieux adaptée que celle de Caquot aux conditions africaines à partir de la méthode dite rationnelle; application à la zone sahélo-soudanaïenne et à la zone côtière; possibilité de choisir une fréquence autre que la classique fréquence décennale.

This paper presents briefly the measurement results obtained on :
1) three catchment areas of the Niamey urban zone,
2) the Makele-Kele basin, at Brazzaville,
3) the Mfoundi basin, that drains the city of Yaoundé.

Attempt to adapt the Caquot's formula by changing its different factors; proposed adjustments for the Ivory Coast different areas and for the sahélo-soudanese zone. Searching of a better adapted formula to african conditions than Caquot's starting from the so said rational formula; application to the sahélo-soudanese and coastal zones; possibilities to select another frequency than the decennial standard one.

Les services techniques du C.I.E.H. se sont penchés il y a déjà plusieurs années sur le problème de la détermination des débits à prendre en compte pour le calcul des réseaux d'assainissement en zone urbaine. En effet, les méthodes les plus utilisées en France, inspirées de la Circulaire Général CG 1333 du Ministère de la Reconstruction et de l'Urbanisme, datant de 1949, et fondées sur l'emploi de la formule de Caquot, avaient conduit dans les régions tropicales à des réseaux, calculés en principe pour évacuer les eaux provenant de l'averse décennale, se révélant souvent incapables d'évacuer la crue annuelle !

1. — RÉSULTATS DES MESURES DE RUISSELLEMENT

A la demande du C.I.E.H., l'O.R.S.T.O.M. a effectué des mesures systématiques de ruissellement sur différents bassins de la zone urbaine de Niamey (Niger).

Elles intéressent trois bassins versants :

— le bassin dit n° 1 est situé en zone forte-3 AVR. 1975
ment urbanisée selon un habitat africain de type
traditionnel,

O. R. S. T. O. M.

Collection de Référence
n° B 7474 Hydr.

TABLEAU 1

	S km ²	Résumé des observations effectuées						Application de la formule de Caquot				Formule C.I.E.H.
		Plus forte crue observée			Estimation de la crue décennale d'après les mesures			Pente		Formule de Paris	Formule de Montpellier	
		Q max 1/s	Q max 1/s. km ²	C	Q max 1/s	Q max 1/s km ²	C	I	C	1/s	1/s	
Niamey												
— Bassin n° 1	0,564	5 480	9 700	0,36	7 000 à 9 500	12 000 à 17 000	0,31	0,0069	0,55	2 600	3 150	7 000
— Bassin n° 2	1,061	8 400	7 900	0,54	10 000 à 13 500	9 000 à 12 500	0,40	0,0070	0,70	6 000	7 400	14 000
— Bassin n° 3-4	1,542	2 600	1 700	0,05	3 100 à 4 600	2 000 à 3 000		0,0050	0,20	1 800	2 600	
Brazzaville												
— Makélékélé	3,080				12 000 à 15 000	4 000 à 5 000		0,0035	0,30	4 400	6 900	
Yaounde												
— M'Foundi	38,800	23 900	615	0,20	42 000	1 080	0,18	0,0062	0,20	21 000	39 000	56 000

— le bassin dit n° 2 comprend pour moitié le centre administratif et commercial et des quartiers d'habitat traditionnel,

— le bassin dit n° 3-4 est situé en zone résidentielle, couverte de villas avec jardin, pourvue d'un réseau de drainage assez lâche sur un terrain assez perméable.

Antérieurement, l'O.R.S.T.O.M. avait déjà effectué, d'une façon plus sommaire des mesures à Brazzaville (Congo) sur le bassin versant du Makelekele.

Plus récemment, des mesures ont été effectuées sur le bassin versant de Mfoundi drainant la ville de Yaounde (Cameroun).

Le tableau 1 donne succinctement les résultats obtenus sur ces cinq bassins versants. Nous y avons fait figurer la superficie en km², le débit maximum observé pendant les trois années de mesures, exprimé en 1/s et en 1/s/km². Nous donnons également le coefficient de ruissellement observé pour la même crue.

En utilisant les méthodes habituelles de l'O.R.S.T.O.M. d'analyse des facteurs du ruissellement et de reconstitution des hydrogrammes observés, une estimation de la crue décennale a été faite, à partir des trois années d'observations. Nous donnons dans les trois colonnes suivantes du même tableau les valeurs du débit maximum et du coefficient de ruissellement obtenus par ces estimations. Ces valeurs représentent donc une extrapolation des valeurs observées et ne doivent être considérées que comme des ordres de grandeur des valeurs recherchées.

Pour les mêmes cinq bassins versants, nous avons appliqué la formule de Caquot dans ses deux versions dites de Paris et de Montpellier en suivant le plus scrupuleusement possible les

recommandations de la Circulaire Générale 1333. Les valeurs adoptées pour la pente et le coefficient de ruissellement sont données dans les deux colonnes correspondantes du tableau 1. Les débits obtenus sont donnés dans les deux colonnes suivantes. On constate immédiatement que les débits obtenus par la formule de Paris sont nettement inférieurs à ceux observés sur trois années. Dans la série de débits observés, ils sont dépassés en moyenne plus de une fois par an. Nous sommes donc fort loin de la crue décennale. La formule de Montpellier donne des débits supérieurs à ceux de la formule de Paris, mais toujours trop faibles sauf peut-être pour le grand bassin versant de Yaounde.

2. — ESSAI D'ADAPTATION DE LA FORMULE DE CAQUOT

Pour pouvoir établir une formule générale applicable en Afrique Tropicale, il faudrait disposer d'un plus grand nombre de résultats de mesures de débit. Cependant les résultats de ces mesures ne seront pas disponibles et exploitables avant plusieurs années et il est intéressant de tenter dès maintenant une approche théorique du problème afin de mettre à la disposition des ingénieurs et projeteurs des formules provisoires donnant des valeurs moins éloignées de la réalité africaine.

La première idée qui vient à l'esprit est de tenter une adaptation de la formule de Caquot en modifiant les différents coefficients intervenant

L. LEMOINE
J. CRUETTE

IV. 5

dans la formule générale de la forme :

$$Q = K I^m C^n A^p$$

dans laquelle Q représente le débit cherché, exprimé en l/s.

- K est un coefficient numérique
- I la valeur moyenne de la pente sur le développement total du parcours de l'eau (exprimée en m/m)
- C le coefficient de ruissellement du bassin
- A la superficie du bassin exprimée en hectares.

Cette formule peut également s'écrire :

$$Q = \left[\frac{10^3 \cdot a}{6(\beta + \delta) \mu^b} \right]^{\frac{1}{1-bf}} \cdot C^{\frac{1}{1-bf}} \cdot I^{\frac{bc}{1-bf}} \cdot A^{\frac{1-bd-\epsilon}{1-bf}}$$

avec :

$$\beta = \delta = 0,75, \epsilon = 0,1, \mu = 3,7, c = 0,363, \\ d = 0,366, f = 0,20.$$

Les paramètres a et b caractérisent le climat dans une loi du type Montana liant l'intensité et la durée des précipitations.

$$i_{(mm/mn)} = a \cdot t_{mn}^{-b}$$

Pour Paris et Montpellier cette formule prend les formes suivantes après introduction des paramètres a et b représentatifs d'une pluie décennale.

$$\text{Paris } Q = 1340 I^{0,30} C^{1,17} A^{0,75} \\ \text{Montpellier } Q = 580 I^{0,16} C^{1,09} A^{0,82}$$

A. Ajustement pour la Côte d'Ivoire.

Un tel ajustement a été tenté pour la Côte-d'Ivoire par le Bureau National d'Études Techniques de Développement (B.N.E.T.D.) dont les ingénieurs utilisent pour leurs études d'édiilité l'une des quatre formules suivantes, applicables sur les différentes zones climatiques de Côte-d'Ivoire.

a) Zone côtière (Abidjan, Sassandra, Agboville)

$$Q = 1260 I^{0,18} C^{1,10} A^{0,84}$$

b) Région centre-est (Bouake, Dimboko, Bondoukou)

$$Q = 2270 I^{0,27} C^{1,15} A^{0,80}$$

c) Région centre-ouest (Man, Gagnoa, Daloa)

$$Q = 1800 I^{0,25} C^{1,14} A^{0,84}$$

d) Région nord (Ferkessedougou, Korhogo)

$$Q = 1250 I^{0,18} C^{1,10} A^{0,87}$$

Des abaques ont été établies par le B.N.E.T.D. pour l'exploitation rapide de ces quatre formules.

B. Essai d'ajustement pour la zone sahélo-soudanienne.

Pour la zone sahélo-soudanienne, une étude similaire a été effectuée par le Département Hydraulique de l'École Inter Etats des Ingénieurs de l'Équipement Rural à Ouagadougou.

Pour les pays d'Afrique tropicale de la zone sahélo-soudanienne, nous disposons des résultats des études effectuées par Y. Brunet Moret et les Services de l'O.R.S.T.O.M.; les courbes « intensité-durée-fréquence » tracées pour les différents pays font ressortir pour les paramètres a et b de la formule de Montana les valeurs suivantes :

b est sensiblement constant et égal à 0,5;

a varie de 7,0 à 7,8 avec une valeur moyenne de 7,5 pour les quatre pays suivants : Mali, Haute-Volta, Niger, Tchad, et pour la bande comprise entre les 10° et 15° parallèles nord. Pour le Sénégal, on peut adopter la valeur $a = 8,5$.

Compte-tenu de la précision que l'on peut espérer de notre formule, nous considérons que l'intensité de la pluie décennale dans cette zone répond approximativement à la formule :

$$i_{mm/mn} = 7,5 \cdot t_{mn}^{-0,5}$$

pour les averses de durée inférieure à 90 minutes.

En reportant les valeurs de a et b dans la formule générale de Caquot, on trouve :

$$Q = 850 I^{0,20} C^{1,11} A^{0,80}$$

L'application de cette formule aux bassins expérimentaux de Niamey donne respectivement :

pour le bassin n° 1 avec $I = 0,007$, $C = 0,55$ et $A = 56,4$ ha

$$Q = 4070 \text{ l/s}$$

pour le bassin n° 2 avec $I = 0,007$, $C = 0,07$ et $A = 106$ ha

$$Q = 8800 \text{ l/s.}$$

Ces chiffres doivent être réduits respectivement de 15 et 10 % pour tenir compte de l'allongement des bassins ce qui conduit à 3500 l/s pour le bassin n° 1 et 7900 l/s pour le bassin n° 2; c'est un peu meilleur que les résultats de la formule de Caquot pour Montpellier; mais on reste encore très en dessous des valeurs expérimentales.

TABLEAU 2
Divers ajustements de la formule de Caquot
 $Q = K I^m C^n A^p$

	K	m	n	p
Paris (M. Grisollet)	1 340	0,30	1,17	0,75
Montpellier (M. Godard)	580	0,16	1,09	0,82
Cote d'Ivoire (B.N.E.T.D.)				
Zone côtière	1 260	0,18	1,10	0,84
Centre Est	2 270	0,27	1,15	0,80
Centre Ouest	1 800	0,25	1,14	0,84
Nord	1 250	0,18	1,10	0,87
Haute Volta				
Ouagadougou	850	0,20	1,11	0,80

Les coefficients des diverses formules citées sont rassemblés dans le tableau 2.

3. — RECHERCHE D'UNE FORMULE PLUS ADAPTÉE AUX CONDITIONS AFRICAINES

Le résultat médiocre obtenu par l'essai d'adaptation exposé ci-dessus, conduit à s'interroger sur la validité pour les pays africains des différentes hypothèses qui ont conduit à la formule de Caquot.

Lorsqu'on effectue une analyse minutieuse des différents paramètres intervenant dans le calcul des exposants de la formule de Caquot, on constate qu'indépendamment des deux paramètres, a et b caractérisant le régime des averses, M. Caquot emploie sept paramètres auxquels il assigne des valeurs numériques très précises, compte-tenu d'observations effectuées sur le fonctionnement des réseaux d'égoûts de la région parisienne. Ceci conduit à multiplier et à accumuler les risques d'erreur, dans un sens qui est difficilement prévisible.

Pour rechercher une formule plus adaptée aux conditions africaines il semble plus logique d'abandonner le schéma d'établissement de la formule de Caquot et de reprendre le raisonnement à partir de la méthode rationnelle, malgré le reproche qui peut être fait à cette méthode de conduire à un surdimensionnement systématique du réseau dont elle ignore la capacité de stockage.

Nous chercherons à donner à notre formule finale une forme monome simple du même type

que celle de Caquot, malgré les imperfections évidentes d'une telle forme, parce que le faible degré de précision que nous pouvons espérer nous autorise à effectuer cette approximation. En effet, en écrivant a priori que le débit peut être donné par une formule du type $Q = f(I) \cdot g(C) \cdot h(A)$ on suppose implicitement, ce qui est sans doute contraire à la réalité que les trois paramètres interviennent dans l'écoulement de façon indépendante. L'intérêt de cette méthode est de conduire à une formulation analytique simple et facilement utilisable, en attendant qu'un nombre suffisant de résultats de mesures réelles du ruissellement permette une analyse plus fine de l'interaction des divers paramètres.

Il convient de rester conscient des approximations ainsi consenties qui rendent inutiles la recherche d'exposants décimaux définis avec 2 ou 3 chiffres significatifs, donnant l'impression d'une précision qui n'est qu'illusoire.

Le débit est donné par la formule :

$$Q = K \cdot C \cdot i \cdot A$$

dans laquelle Q représente le débit (en litres/seconde), K un coefficient numérique dépendant des unités choisies, C le coefficient de ruissellement, A la superficie du bassin (en hectares) et i l'intensité de l'averse de fréquence décennale dont la durée est égale au temps de concentration du bassin.

Pour tenir compte de l'inégale répartition des averses sur le bassin, on peut adopter un certain coefficient d'abattement et nous proposons d'affecter à la superficie l'exposant 0,95.

L'intensité de l'averse est liée à la durée par une formule du type Montana de la forme :

$$i = a t^{-b}$$

La formule donnant le débit devient :

$$Q_{1/s} = \frac{1000}{6} C i_{mm/mn} A_{ha}^{0,95}$$

soit :

$$Q_{1/s} = \frac{1000}{6} \cdot a \cdot C t^{-b} A^{0,95}$$

Il reste donc à évaluer le temps de concentration en fonction des paramètres hydrauliques : pente du réseau d'assainissement I , (en mètres par mètre), et longueur du plus long chemin hydraulique L , (en hectomètres). En prenant pour expression de la vitesse une formule de type Chéry ($U = Z\sqrt{I}$), le temps de parcours dans les canalisations du réseau s'exprime sous la forme :

$$t_1^s = \frac{L \text{ mètres}}{U^{m/s}} = \frac{L}{Z\sqrt{I}}$$

Pour tenir compte du temps de ruissellement de l'eau en surface à l'extérieur du réseau, nous majorerons ce temps t_1 de 25 %. D'autre part, compte-tenu des caractéristiques moyennes des canalisations utilisées pour l'assainissement, nous pouvons prendre $Z = 25$, ce qui donne pour le temps de concentration :

$$t_{\text{secondes}} = \frac{1,25 L_m}{25 \sqrt{I}} \text{ ou } t_{mn} = \frac{1,25}{60} \cdot \frac{100}{25} \frac{L_{hm}}{\sqrt{I}}$$

$$= \frac{1}{12} L_{hm} I^{\frac{1}{2}}$$

Si nous reportons cette valeur dans l'équation donnant le débit, nous obtenons la formule générale suivante :

$$Q_{1/s} = 167 \cdot 12^b \cdot a \cdot C \cdot I^{b/2} \cdot L_{hm}^{-b} \cdot A_{ha}^{0,95}$$

a) Application à la zone sahélo-soudanienne.

Dans cette région, nous avons vu que l'on pouvait prendre en première approximation, pour les averses de durée inférieure à 90 minutes $a = 7,5$ et $b = 0,5$.

Ces valeurs reportées dans la formule générale donnent :

$$Q_{1/s} = 4330 \cdot C \cdot I_{m/m}^{0,25} \cdot L_{hm}^{-0,5} \cdot A_{ha}^{0,95}$$

Nous avons appliqué cette formule aux deux premiers bassins versants de Niamey et au grand bassin de Yaoundé. Pour ce dernier, le résultat obtenu est nettement trop fort, ce qui n'est pas surprenant car son temps de concentration est nettement supérieur à 90 minutes; par contre, pour les deux premiers, les valeurs trouvées sont beaucoup plus proches des valeurs expérimentales (dernière colonne du tableau 1). Nous remarquons que pour le bassin n° 1 relativement très allongé, la valeur calculée est un peu faible par rapport aux valeurs mesurées, alors que la valeur calculée est un peu trop forte pour le bassin n° 2. Cela peut provenir en particulier des valeurs du coefficient de ruissellement qui ont été prises très différentes, pour des bassins de comportement assez voisin.

Signalons en passant que la formule du B.N.E. T.D. pour la région de Korhogo aurait donné pour les deux bassins étudiés 6 900 l/s pour le bassin n° 1 et 16 000 l/s sur le bassin n° 2, après application du coefficient de réduction dû à l'allongement.

L'exposant affectant la surface est sans doute un peu trop élevé pour une formule qui ne fait pas intervenir la longueur du bassin, ce qui

conduit à surévaluer les débits pour les bassins de forte superficie.

Nous avons vu également que pour la zone sahélo-soudanienne le coefficient b variait très peu autour de la valeur 0,5, alors que le coefficient a varie suivant les pays entre 7,0 et 7,9. On peut remarquer que les fluctuations de a n'affectent que le coefficient numérique de la formule mais non les exposants; ce coefficient numérique qui vaut :

$167 \cdot 12^{0,5} \cdot a = 577 a$ varie entre les valeurs extrêmes 4 050 et 4 600, avec une valeur moyenne de 4 330 que nous avons retenue pour Niamey. Pour le Sénégal avec $a = 8,5$, le coefficient numérique serait 4 900.

b) Application à la zone côtière.

L'application à la zone côtière est plus délicate car le régime des pluies y est connu avec moins de précision, et il est beaucoup plus variable.

Un essai d'ajustement d'après les courbes « intensité-durée-fréquence » tracées par le service météorologique du Ghana pour la station de Kumasi, conduisent à une expression de la forme

$$i_{mm/mn} = 12,7 \cdot t^{-0,5}$$

pour des averses de durée comprise entre 10 et 90 mn soit $a = 12,7$ et $b = 0,5$.

Pour la ville côtière d'Axim les courbes tracées par le même service conduisent à la formule :

$$i_{mm/mn} = 10 \cdot t^{-0,4} \text{ soit } a = 10 \text{ } b = 0,4.$$

L'adoption de ces coefficients nous conduirait :

— pour les zones forestières de l'intérieur à la formule :

$$Q_{1/s} = 7325 C \cdot I_{m/m}^{0,25} \cdot L_{hm}^{-0,5} \cdot A_{ha}^{0,95}$$

— pour la zone côtière à la formule :

$$Q_{1/s} = 4500 C \cdot I_{m/m}^{0,20} \cdot L_{hm}^{-0,4} \cdot A_{ha}^{0,95}$$

4. — CHOIX DE LA FRÉQUENCE

Il est possible d'introduire dans les dernières formules proposées, non pas uniquement la pluviométrie de fréquence décennale, mais la pluviométrie d'une fréquence quelconque. En remarquant que le paramètre b est pratiquement indépendant de la fréquence et que le débit est proportionnel au paramètre a , il est possible d'établir un tableau de coefficients de correction pour des périodes de retour 1 an, 2 ans, 5 ans, 20 ans, à partir des

TABLEAU 3

Période de retour	1 an	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans
Zone sahélo-soudanienne ($b = 0,5$)					
– valeur de a	5,4	6,0	6,9	7,5	8,2
– coefficient de correction	0,72	0,80	0,92	1,00	1,08
Sénégal ($b = 0,5$)					
– valeur de a	6	6,75	7,6	8,5	9,1
– coefficient de correction	0,71	0,80	0,90	1,00	1,07
Zone côtière : Axim-Abidjan ($b = 0,4$)					
– valeur de a	5,6	6,7	8,9	10	12,6
– coefficient de correction	0,56	0,67	0,89	1,00	1,26
Zone côtière : Accra ($b = 0,4$)					
– valeur de a	4,6	5,3	6,8	8,5	9,2
– coefficient de correction	0,54	0,62	0,80	1,00	1,08
Zone forestière : Kumasi ($b = 0,5$)					
– valeur de a	7	8,9	11	12,7	14,3
– coefficient de correction	0,55	0,70	0,87	1,00	1,13

calculs faits pour la période 10 ans. Ce schéma de calcul suppose que les différents facteurs entrant dans la formule sont indépendants, ce qui n'est pas évident en ce qui concerne la pluviométrie et le coefficient de ruissellement. Nous donnons dans le tableau 3 les coefficients de correction.

CONCLUSIONS

Ces essais d'adaptation de la formule de Caquot ont au moins l'avantage de se rapprocher de la réalité en utilisant les résultats relativement récents des études de l'intensité des précipitations.

Il reste cependant que toutes ces formules nécessitent la connaissance du coefficient de ruissellement. Ce coefficient apparaissant affecté d'un exposant égal ou légèrement supérieur à 1, le résultat obtenu est presque directement proportionnel à l'estimation qui en est faite.

La confrontation entre les résultats des calculs et la réalité n'a été faite que pour deux bassins de Niamey. Ceux-ci ne forment qu'un très petit échantillon pour de faibles superficies. Le passage à des bassins versants plus importants risque de poser des problèmes. D'autre part, ils n'ont été observés que pendant trois ans ce qui est nettement insuffisant pour prouver la validité des méthodes proposées.

Enfin, on est conduit à des valeurs très élevées pour les débits spécifiques et l'ingénieur sera amené à rechercher un équilibre entre la probabilité du phénomène contre lequel il veut se protéger et le montant des crédits à engager. Toutes les considérations précédentes ont utilisé comme base de comparaison l'estimation des crues décennales sur les bassins de Niamey. Le passage à d'autres périodes de retour pose de nouveaux problèmes étant donné que les tableaux de coefficients de correction n'ont pas été contrôlés expérimentalement.

Pour toutes ces raisons, le Conseil du C.I.E.H. lors de sa réunion de Nouakchott en mars 1971, a recommandé d'inclure des mesures de débits ruisselés dans les études de projets d'assainissement actuellement en cours pour de nombreuses villes. L'analyse des résultats ainsi obtenus permettra certainement d'apporter des éléments de réponse à ces questions.

En effet, l'étude des facteurs du ruissellement effectuée par M. Herbaud sur les bassins de Niamey, semble prometteuse sur plusieurs points. Elle laisse en particulier entrevoir la possibilité de prévoir l'évolution du ruissellement dans les régions à urbanisation croissante.

La mise en œuvre des méthodes que l'on peut imaginer serait plus complexe que l'emploi d'abaques découlant de formules en forme de monomes; mais les moyens de calcul actuels permettent d'envisager de telles méthodes.