

Fortes crues des petits cours d'eau du Sahel

Forme de l'hydrogramme

Pierre RIBSTEIN (1), Jean-André RODIER (2)

RÉSUMÉ

Reprenant une étude sommaire datant de 1965, les auteurs, en partant des données de 29 bassins représentatifs au Sahel, ont mis au point un ensemble de règles pratiques pour l'estimation du débit maximum d'une crue décennale pour des bassins versants non observés de superficie inférieure à 12 km². Le ruissellement superficiel étant la règle, la méthodologie s'appuie sur l'hydrogramme unitaire avec détermination du volume de ruissellement par le coefficient de ruissellement K_r , puis de la pointe de la crue par l'estimation des caractéristiques de l'hydrogramme : durée du ruissellement T_b et coefficient de pointe α (rapport du débit maximum au débit moyen de ruissellement). La première partie de l'étude concerne les bassins pour lesquels l'averse décennale est unitaire : on considère alors l'hydrogramme unitaire instantané. La deuxième partie concerne les cas les plus fréquents des petits bassins pour lesquels l'averse décennale n'étant plus unitaire, on prend en compte un hydrogramme composé. Pour l'étude de celui-ci, le concept de bassins fictifs permet d'explorer tout le champ de variation des caractéristiques de cet hydrogramme en fonction de quatre facteurs principaux : surface, hauteur de pluie décennale, pente et infiltrabilité. On constate alors que α demeure sensiblement constant. Cette étude a permis également une analyse de la sensibilité des variations du débit maximum aux variations de ces facteurs principaux.

La méthodologie doit être employée conjointement avec un répertoire des aptitudes à l'infiltrabilité des couches superficielles du sol et un questionnaire permettant de tenir compte des valeurs extrêmes éventuelles d'autres facteurs de ruissellement dont l'influence sur les valeurs de T_b ou de α peut être significative.

MOTS-CLÉS : Ruissellement — Crues — Formes de l'hydrogramme — Petits bassins versants — Sahel.

ABSTRACT

PEAK FLOWS FROM SMALL SAHEL BASINS : HYDROGRAPH FORM

In updating a brief study of 1965, the authors, starting from the data from 29 representative basins in the Sahel, developed practical rules for the estimation of the peak discharge of the 10 year flood for ungauged basins of less than 12 km². Surface runoff being common, the methodology uses the unit hydrograph concept, with the determination of the surface runoff volume using the runoff coefficient K_r , and the determination of the peak flood by the estimation of the hydrograph characteristics : the runoff duration T_b and the peak coefficient α (ratio of maximum discharge to the average surface runoff discharge). The study is divided into two parts : the first deals with the basins for which the 10 year storm corresponds to the unit hydrograph where the hydrograph considered is the instantaneous unit hydrograph ; the second part corresponding to the most frequent conditions, deals with smaller basins for which the hydrograph to be considered with the 10 year storm is a composite hydrograph.

For this study the concept of fictitious basins permits the survey of the variations of the hydrograph characteristics in relation to four main factors : area, 10 year storm depth, slope and infiltration. It is noted that the α coefficient remains approximately constant. This study permitted also a sensitivity analysis of the variations of maximum discharge with the main factors.

The methodology should be used jointly with table of the infiltration capacity of the upper soil layers and with a questionnaire taking into account the possible extreme values of other runoff factors whose influence on T_b or α may be significant.

KEY WORDS : Surface runoff — Floods — Hydrograph shape — Small basins — Sahel.

(1) Hydrologue ORSTOM, Centre ORSTOM, BP 5045, 34032 Montpellier.

(2) Ancien chef du Service Hydrologique de l'ORSTOM, 39, rue de la Parée, 85470 Bretignolles-sur-Mer.

1. INTRODUCTION

Après de trop nombreuses ruptures d'ouvrages, ponts ou barrages sur les petits cours d'eau du Sahel, l'ORSTOM vers 1955 a consacré une partie importante de ses programmes de recherches en hydrologie à l'analyse des fortes crues dans cette région de l'Afrique qui reçoit entre 150 et 750 mm de précipitations par an.

Les recherches ont été concentrées sur des crues de fréquence décennale pour deux raisons : on cerne assez bien la hauteur d'averse et le débit maximum de crue de cette fréquence ; on a même observé des crues de valeurs proches sur certains bassins.

En outre, compte tenu du coût des ouvrages sur ces cours d'eau drainant de faibles ou assez faibles surfaces, on choisit souvent cette fréquence décennale ou une fréquence voisine pour la crue du projet.

L'approche statistique directe à partir des débits était à exclure, car il était impossible de créer et d'exploiter correctement un réseau hydrométrique pour plusieurs centaines de stations pendant 15 ou 20 ans. On a en conséquence étudié le mécanisme de transformation des pluies en débits sur des bassins aussi représentatifs que possible, en vue de partir des longues séries de précipitations journalières alors disponibles pour estimer les caractéristiques de la crue décennale. La méthodologie permettant de passer des pluies aux débits a évolué depuis 1955 ; elle a été révisée en partie de 1985 à 1986 et au cours de cette révision, il a été possible de faire un certain nombre de constatations qui sont présentées dans cet article.

2. LA NOTION DE CRUE DÉCENNALE

La méthode la plus fiable pour passer des pluies aux débits consiste à simuler une longue série de crues à l'aide d'un modèle mathématique ajusté sur la courte série des crues observées sur chaque bassin représentatif en tenant compte de l'hétérogénéité morphopédologique des bassins et de la variabilité spatio-temporelle des averses. Les tentatives faites dans ce sens (voir CHEVALLIER *et al.*, 1985, par exemple) ont été jusqu'à présent décevantes, tout au moins en ce qui concerne l'estimation de la pointe de crue Q_{10} (RODIER et RIBSTEIN, 1988).

On a dû recourir à des méthodes plus sommaires, la structure simple des averses (courtes et intenses) et la nature de l'écoulement (ruissellement superficiel presque exclusivement) permettent d'utiliser la méthode de l'hydrogramme unitaire avec un modèle plus ou moins global d'où les propositions de base suivantes.

La crue décennale est la crue résultant d'une pluie journalière de hauteur décennale P_{10j} , toutes les autres caractéristiques de cette pluie (répartition spatio-temporelle des intensités, état initial d'humidité du sol) étant voisines des caractéristiques les plus fréquentes pour les fortes averses. Cette restriction est importante, car SEGUIS (1986) a montré qu'au Sahel, avec l'indice des précipitations antérieures par exemple, on peut observer le même volume de crues pour P_{10j} avec une valeur médiane de cet indice ou pour des averses de hauteur supérieure de 17 % ou inférieure de 29 % à P_{10} , si cet indice est particulièrement faible ou fort par rapport à sa valeur la plus fréquente. Cette hypothèse de base valable pour le Sahel est plus contestable pour les régions humides où parfois la hauteur de précipitation ne joue pas un rôle aussi important.

On admet en première approximation que le bassin est homogène, que la pluie $\overline{P_{10j}}$ sur le bassin est homogène avec une hauteur moyenne déduite de P_{10j} par un coefficient de réduction ou d'abattement k (VUILLAUME, 1974). Il n'y a qu'un corps d'averse avec une pointe unique.

Pour la fonction de production, on utilise le concept très simple de coefficient de ruissellement K_r , rapport du volume de ruissellement superficiel au volume précipité. La séparation sur les hydrogrammes entre ruissellement superficiel et autres formes de l'écoulement ne pose généralement pas de problèmes pour le niveau de précision recherché. Après quelques essais, le concept de pluie nette (hauteur précipitée réduite des pertes par absorption et infiltration) avait été abandonné, nos connaissances sur les capacités d'infiltration des sols étant alors insuffisantes.

Le coefficient K_r croît plus ou moins vite avec la hauteur de l'averse. L'extrapolation nécessaire pour estimer la valeur décennale de K_r correspondant à P_{10j} peut être délicate mais, heureusement, elle est généralement faible.

Pour la fonction de transfert, on utilise trois caractéristiques de l'hydrogramme unitaire instantané : le temps de base (durée du ruissellement superficiel) T_{b1} , le temps de montée T_{m1} et le coefficient de pointe α_1 rapport du débit maximum ruisselé au débit moyen ruisselé pendant T_{b1} . Ces caractéristiques sont déterminées pour les fortes crues, afin d'éliminer la variabilité des temps de parcours donc de T_{b1} , T_{m1} , et α_1 pour des intensités de ruissellement très différentes.

Au Sahel, on admet que T_{b1} se termine pratiquement à la première cassure de la courbe de récession en coordonnées semi-logarithmiques. La seule difficulté pour déterminer T_{b1} résulte des cas de ruissellement de la traîne d'averse en terrains imperméables (RODIER, 1984-1985).

Les volumes d'écoulements décennaux Vr_{10} calculés par CHEVALLIER *et al.*, (1985) avec un modèle à discrétisation spatiale étaient très proches des valeurs de Vr_{10} obtenues par le modèle « global ». En outre, l'ensemble des valeurs de Q_{10} calculées par ce dernier modèle est cohérent, des bassins de caractéristiques voisines présentant des résultats voisins. En conclusion, la valeur de Q_{10} provenant du modèle global doit être considérée comme un simple indicateur statistique mais cet indicateur est assez proche de la valeur vraie.

3. TRANSPOSITION A DES BASSINS NON OBSERVÉS

Cette opération n'est possible que pour certains types de climats et certaines caractéristiques hydrologiques (RODIER, 1982), elle peut être très difficile et même parfois impossible (basses eaux). Dans certains cas favorables, comme le Sahel, avec un seul type d'averse à structure simple, un ruissellement superficiel prédominant, une couverture végétale peu dense, peu de zones cultivées et des types de sols peu nombreux, le nombre de facteurs de l'écoulement est faible et la transposition peut donner en général des résultats applicables dans la limite de précision requise par les applications pratiques (20 % par exemple pour Q_{10}).

3.1. MÉTHODOLOGIE AUVRAY-RODIER

En 1965, RODIER et AUVRAY présentaient une méthodologie déterministe, les éléments du modèle global ($\overline{P_{10}}$, Kr_{10} , Tm_1 , Tb_1 et α_1) étaient obtenus à partir d'une ou plusieurs des caractéristiques du bassin : superficie S , catégories de perméabilité et de pente. Couvert végétal et conditions climatiques n'étaient pas pris en compte explicitement, mais des règles de transposition étaient données pour de grands ensembles géographiques, zones sahéliennes et subdésertiques par exemple, à l'intérieur desquels ces facteurs varient peu. La formule suivante résume les opérations successives :

$$Q_{10} = k \overline{P_{10}}^{10} Kr_{10} \alpha_1 S/Tb_1$$

Cette méthode présente deux points faibles. D'abord la détermination des éléments du modèle global peut être délicate et ne peut parfois être effectuée sans risque que par des hydrologues confirmés. Ensuite, l'infiltrabilité d'une catégorie de sol ne pouvait pas être quantifiée ce qui explique un classement à caractère largement subjectif (indice de perméabilité) et des erreurs possibles sur Q_{10} de 100 %. La pente était mieux définie grâce à un indice global de pente (I_g) facile à calculer (DUBREUIL, 1965).

3.2. MÉTHODOLOGIE PAR RÉGRESSIONS MULTIPLES

Vingt ans après, avec les progrès des recherches hydrologiques et la masse d'observations recueillies sur les petits bassins et présentées pour la plupart dans un recueil (DUBREUIL *et al.*, 1972), PUECH et CHABI-GONNI (1984) ont proposé de déterminer Q_{10} par des régressions multiples à partir des valeurs de Q_{10} données dans le recueil. Les auteurs proposent deux formules :

$$Q_{10} = a S^b Kr_{10}^c \quad \text{ou} \quad Q_{10} = a S^b I_g^c$$

P_{10j} n'est pas prise en compte, mais elle varie peu (de 60 à 105 mm pour le Sahel). La première formule néglige la pente, mais celle-ci n'est forte qu'en zone subdésertique ou au sud du Sahel. La seconde formule ne prend pas en compte l'infiltrabilité, mais les bassins perméables observés sont très peu nombreux et leur poids est négligeable dans les régressions.

Avec une mise en œuvre beaucoup plus simple on aboutit à une imprécision un peu plus forte qu'avec la méthode de 1965. Le trop petit nombre de paramètres pris en compte, le principe des régressions qui privilégie les conditions moyennes et enfin le manque d'indice quantitatif lié à l'infiltrabilité font que les résultats ne sont acceptables que pour des bassins peu perméables à pente modérée, sans dégradation hydrographique. Mais cette méthode est la seule à donner des résultats pour une superficie excédant 200 km².

4. ESSAIS D'AMÉLIORATION DES MÉTHODES DE TRANSPOSITION

4.1. QUELQUES MESURES PRIORITAIRES

Devant ces difficultés l'ORSTOM et le CIEH ont proposé, pour l'immédiat, trois directions de recherches, avec pour objectif l'élimination des risques de très fortes erreurs. Ces trois séries d'opérations, sont décrites ci-après.

Mise au point d'un répertoire des aptitudes à l'infiltration des couches superficielles du sol

Cette opération a été possible grâce d'une part à la technique du minisimulateur qui peut donner pour chaque type d'état de la surface des indices quantitatifs d'infiltrabilité, et d'autre part au faible nombre de types de formations superficielles au Sahel. Les résultats définitifs ont été publiés récemment (CASENAVE et VALENTIN, 1988).

Mise au point d'un questionnaire (Check list)

Cette opération est à utiliser avant application de toute méthode. Il guide les utilisateurs dans le choix de la méthode la plus appropriée, surtout pour prendre en compte l'influence de paramètres n'entrant pas dans la méthodologie de calcul dès que leurs valeurs s'écartent des conditions courantes.

Ce guide concerne notamment : la forme du bassin, la disposition du chevelu hydrographique, la présence ou non de rupture de pente, l'hétérogénéité et la perméabilité du bassin, la rugosité du sol et l'influence de l'homme. Par exemple, lorsque les différences de perméabilités sont bien marquées, le questionnaire préconise l'emploi du concept du bassin réduit aux seules surfaces les moins perméables pour la mise en œuvre de l'hydrogramme unitaire ce qui réduit les inconvénients du modèle global.

La consultation d'un tel questionnaire avant utilisation de régressions multiples peut avoir d'autres applications. Lorsque des paramètres non pris en compte par les régressions ont une valeur telle que leur influence devient significative, l'emploi du questionnaire permet d'apporter des retouches aux résultats ou, au moins, de donner un signal d'alarme. Une ébauche de ce questionnaire est présentée par RODIER et RIBSTEIN (1988), il sera à remettre à jour périodiquement.

Révision des caractéristiques des tout petits bassins

C'est la catégorie de bassins pour laquelle les règles d'estimation de 1965 étaient les plus hasardeuses. C'est cette opération qui est traitée dans le présent article. La limite de S fixée à 5 km² a été reportée à 10 km² pour couvrir un plus grand nombre de cas où le bassin était trop petit pour que l'averse décennale soit unitaire.

4.2. RÉVISION DES COEFFICIENTS DE RUISSELLEMENT

Cette opération a été présentée dans les *cahiers de l'ORSTOM* (RODIER, 1984-1985). Par rapport à la note de 1965, on a utilisé les données de 18 bassins représentatifs supplémentaires (il y en avait 11 en 1965) mais on a aussi cherché plus de rigueur dans la détermination des valeurs de Kr.

Les valeurs de Kr prises en compte autrefois correspondaient à des valeurs de P_{10j} valables pour chaque bassin représentatif. Elles variaient largement de l'un à l'autre, d'où une certaine imprécision dans le tracé donnant Kr10 en fonction des caractéristiques du bassin, et dans l'utilisation de ces courbes pour la transposition (le risque d'erreur pouvait parfois dépasser 20 %).

En 1985, RODIER a tracé deux réseaux de courbes (pour P_{10j} = 100 mm et P_{10j} = 70 mm). Ces précipitations ponctuelles présentent un diagramme d'intensité avec un corps d'averse, une averse préliminaire et une traîne. Elles se produisent deux jours après une averse de 30 mm, en début de saison des pluies. Ces conditions d'humidité antérieures sont légèrement plus favorables que la situation médiane donnée par SEGUIS (1986). La pluie moyenne sur le bassin est obtenue en multipliant P_{10j} par le coefficient d'abattement k. On obtient ainsi Kr100 et Kr70.

Kr est déterminé à partir de trois paramètres principaux : superficie S, pente et infiltrabilité. En 1965, la pente était représentée par un indice global Ig (DUBREUIL, 1965) en fait très voisin de la pente longitudinale. Ig a été révisé pour le cas de pente transversale dont la moyenne I_T dépasse Ig de 30 % en lui substituant dans ce cas I_{G_{cor}} (I_{G_{cor}} = (I_T + Ig)/2). On a choisi pour cet indice six valeurs repères pour les courbes de Kr (Ig = 60, 25, 15, 7 et 3 m.km⁻¹).

Les infiltrabilités globales sont repérées par cinq classes de P1 à P5 : rigoureusement plan et Imperméable (P1), Imperméable (P2), Relativement Imperméable (P3), Perméable (P4), Très Perméable (P5). Il n'existe pas de bassin

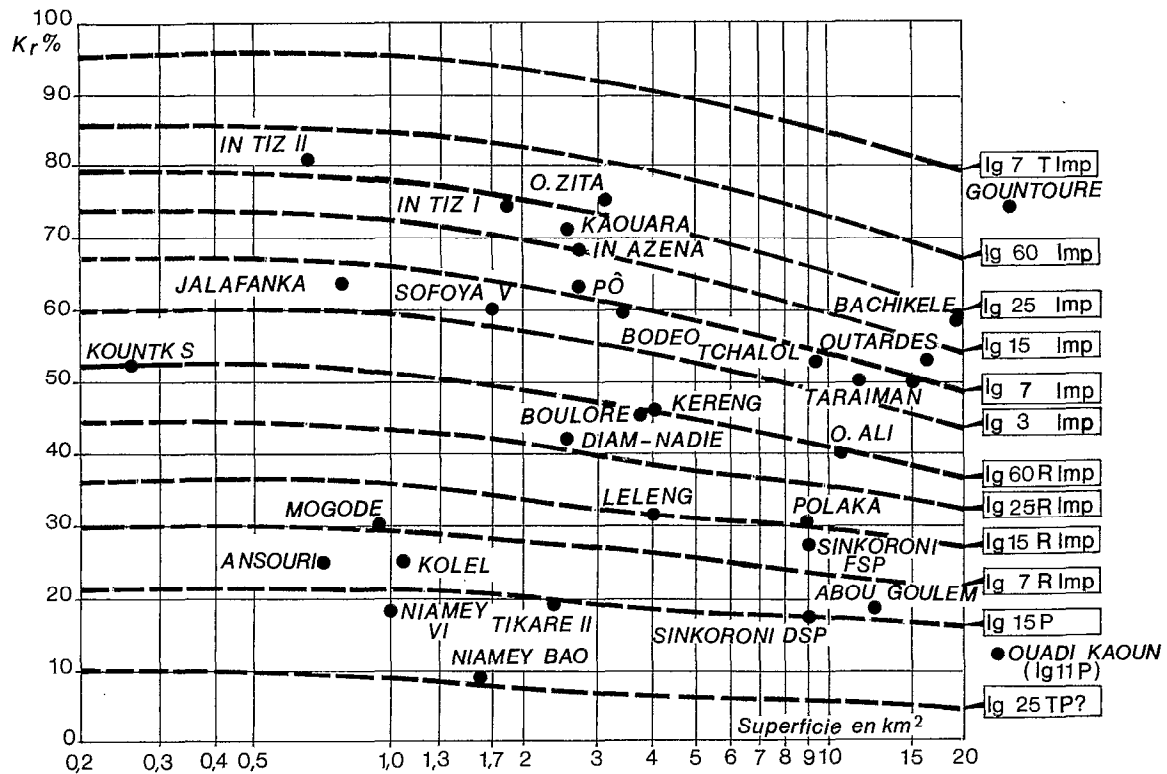


FIG. 1. — Régimes sahéliens et subdésertiques. Coefficient de ruissellement pour précipitation ponctuelle $H = 100$ mm

P1 mais il y a des bassins classés entre P2 et P1. On pourra donner plus tard des valeurs quantitatives à ces infiltrabilités repères grâce au répertoire (CASENAVE et VALENTIN, 1988).

Enfin on a cherché une limite supérieure à K_r ; les études de la pluie au sol commencées par POUYAUD (1986) nous inclinaient à croire que la limite théorique de 100 % pouvait être trop faible. En décembre 1973, sur le bassin tunisien de l'oued Zita ($S = 3$ km^2 , perméabilité P2), les observations d'une averse de 99 mm ayant le même hydrogramme que l'averse de 100 mm citée plus haut, avec les mêmes conditions d'humidité et une température plus faible ont conduit à $K_r = 77$ % (ou par rapport à la pluie au sol $K_r = 67$ %). On a admis cette limite comme ordre de grandeur pour P2 (avec les conditions : $I_g = 60$, $S = 3$ km^2). Cette limite peut être dépassée pour des bassins plus imperméables P2 (P1), et pour certaines tranches d'intensité du corps d'averse.

On présente sur la figure 1 le réseau de courbes pour $K_r 100$; 100 mm est environ la pluie décennale journalière de la partie du Sahel comprise entre les isohyètes 600 et 700 mm de pluie annuelle. Les valeurs de K_r sont plus faibles que celles de 1965 pour les raisons suivantes : hypothèses plus réalistes sur la valeur limite de K_r et sur le diagramme d'intensité des averses (prise en compte de la traîne) et coefficient d'abattement k plus faible. La décroissance de K_r quand S croît résulte de la décroissance de la pluie moyenne décennale sur le bassin, P_{10} , de l'augmentation des pertes dans le lit et les petites plaines d'inondation, de la diminution de la pente à l'aval et d'un début de dégradation hydrographique. On devra interpoler entre les deux réseaux de courbes $K_r 70$ et $K_r 100$.

4.3. RÉVISION DE LA FONCTION DE TRANSFERT

Si S est assez grand et I_g assez faible pour que le temps de montée T_{m1} soit supérieur à la moitié du corps efficace, alors l'averse décennale est unitaire et la fonction de transfert est représentée par l'hydrogramme unitaire instantané avec ses caractéristiques T_{m1} , T_{b1} , et α_1 . Mais plus généralement, ce n'est pas le cas et on doit découper l'averse décennale en tranches d'intensités de durée inférieure à la moitié du temps de montée et recomposer l'hydrogramme à partir des hydrogrammes instantanés successifs ; c'est l'hydrogramme composé avec ses caractéristiques T_{m2} ,

Tb2 et α_2 , dont la forme dépend alors de la durée et de l'intensité de l'averse décennale, et de l'évolution dans le temps de Kr.

4.3.1. Cas de l'hydrogramme unitaire

4.3.1.1. Forme de l'hydrogramme

On doit bien concevoir que l'hydrogramme d'un bassin résulte de la combinaison des hydrogrammes des différents tributaires. Ceux-ci se fondent en un hydrogramme à pointe unique, mais les pointes peuvent rester séparées dans le cas de réseau en arête déportée (RODIER et RIBSTEIN, 1988) ou de deux bassins successifs raccordés par un pédoncule ; les coefficients Tm1, Tb1, α_1 , dépendent donc non seulement de S et de $I_{g_{cor}}$ mais aussi de la forme du bassin, des caractéristiques du chevelu hydrographique, de la configuration des lits (IBIZA, 1988), de la présence de marais, etc. L'hétérogénéité des perméabilités du bassin joue également un rôle ; par exemple, avec une partie amont P5 et une partie aval P2, le temps de base peut correspondre au ruissellement de la partie aval. Dans ce cas, le maximum correspondant uniquement à la partie aval, α_1 risque d'avoir une valeur anormalement forte. Toutes ces caractéristiques ont été revues par RODIER (1984-1985) d'après les diagrammes originaux avec des règles de choix tendant à éliminer les valeurs trop longues pour Tm1 et Tb1.

4.3.1.2. Temps de montée Tm1

On n'a retenu que deux paramètres pour expliquer les variations de Tm1 : S et $I_{g_{cor}}$. La dispersion est assez grande pour de multiples raisons, mais nous n'en citerons que deux : l'arrivée de la crue sous forme de vague ou de mascaret (Tm1 très court) ou le cas d'hydrogrammes à pointes multiples, la plus forte n'étant pas toujours la même. Pour cette raison, on a admis un support théorique très simple : Tm1 est un temps de parcours de l'eau de ruissellement sur le bassin. Tm1 comprend un premier temps de ruissellement sur les versants jusqu'au premier tributaire d'ordre 1 (surface correspondante à S_0 en principe), un second temps d'écoulement dans le réseau hydrographique.

On a admis sur les versants un temps de parcours constant, b, et dans le lit une vitesse de propagation constante (le temps de propagation étant alors proportionnel à $\sqrt{S-S_0}$).

La formule générale pour Tm1 serait : $T_m = a(S-S_0)^{0,5} + b$

a et b étant des constantes différentes pour chaque valeur de $I_{g_{cor}}$ d'où les régressions suivantes (Tm1 en minutes et S en km^2) :

$I_{g_{cor}} = 60$ (m km^{-1})	Tm1 = 3,02 (S-0,1) ^{0,5} + 4,5
$I_{g_{cor}} = 25$ (m km^{-1})	Tm1 = 6,64 (S-0,1) ^{0,5} + 9
$I_{g_{cor}} = 15$ (m km^{-1})	Tm1 = 9,49 (S-0,2) ^{0,5} + 16
$I_{g_{cor}} = 7$ (m km^{-1})	Tm1 = 20 (S-0,3) ^{0,5} + 23
$I_{g_{cor}} = 3$ (m km^{-1})	Tm1 = 71 (S-0,5) ^{0,5} + 75

4.3.1.3. Temps de base Tb1

Pour les très petits bassins à fort ruissellement la première cassure sur la courbe de récession correspond à des débits compris entre 0,9 $m^3/s.km^2$ et 0,3 $m^3/s.km^2$, valeurs trop fortes pour un écoulement retardé. En fait, il s'agit alors en grande partie de la vidange du réseau hydrographique dont l'eau a déjà ruisselé sur le sol.

C'est pourquoi on a majoré de 20 % les valeurs de Tb1 trouvées avec la première cassure. Cette majoration déjà un peu forte pour S = 10 km^2 serait à éliminer pour S = 20 km^2 par exemple.

La dispersion étant plus faible pour Tb1 que pour Tm1 on peut serrer de plus près les phénomènes et admettre que la vitesse dans le lit croît légèrement de l'amont vers l'aval d'où un exposant de S- S_0 inférieur à 0,5. On a admis 0,45, et on trouve ainsi (Tb1 en minutes et S en km^2) :

$I_{g_{cor}} = 60$ (m km^{-1})	Tb1 = 15,5 (S-0,05) ^{0,45} + 16
$I_{g_{cor}} = 25$ (m km^{-1})	Tb1 = 28 (S-0,1) ^{0,45} + 30
$I_{g_{cor}} = 15$ (m km^{-1})	Tb1 = 35,3 (S-0,15) ^{0,45} + 50
$I_{g_{cor}} = 10$ (m km^{-1})	Tb1 = 58,85 (S-0,2) ^{0,45} + 80
$I_{g_{cor}} = 7$ (m km^{-1})	Tb1 = 98,1 (S-0,3) ^{0,45} + 120
$I_{g_{cor}} = 3$ (m km^{-1})	Tb1 = 215 (S-0,5) ^{0,45} + 300

Ces régressions comme celles de T_{m1} correspondent aux conditions les plus fréquentes pour les paramètres non pris en compte et au début de la saison des pluies.

4.3.1.4. Coefficient de pointe α

Rappelons que pour un hydrogramme triangulaire, α serait égal à 2. RODIER et AUVRAY (1965) avaient trouvé des valeurs de 4 à 5 pour certains bassins ruisselant bien. En 1986, sur 27 valeurs étudiées 17 sont comprises entre 2,2 et 2,7. Les valeurs en dehors de cette fourchette peuvent s'expliquer par des considérations développées en 4.3.1.1. et dont il est tenu compte dans le questionnaire.

On en trouvera trois exemples ci-après :

Réseau en arête déportée	: Bassin de Tchalol (Burkina Faso)	$\alpha = 1,85$
Réseau radial ou en éventail	: Bassin de Kaouara (Niger)	$\alpha = 3,38$
Bassin hétérogène	: Bassin de Polaka (Burkina Faso)	$\alpha = 2,78$

Les valeurs de 4 à 5 de 1965 seront expliquées plus loin.

La conclusion de cette étude est que moyennant l'utilisation préalable du questionnaire on peut adopter dans la pratique une valeur constante de α égale à 2,5 pour l'hydrogramme unitaire instantané.

4.3.2. Cas de l'hydrogramme composé

Pour établir celui-ci, il faut disposer d'un hyétoqramme type pour la pluie décennale P_{10j} .

4.3.2.1. Diagramme de variations des intensités pour la pluie décennale

Ce travail s'appuie sur deux études fines des intensités (LE BARBE, 1982 ; BOUVIER, 1985) pour deux stations (Ouagadougou, $P_{10j} = 103$ mm et Niamey $P_{10j} = 93$ mm) observées sur une longue période et sur les données recueillies à la mare d'Oursi au Burkina Faso ($P_{10j} = 75$ mm). Nous avons déterminé les principales caractéristiques de la pluie décennale : hauteur du corps d'averse (intensité supérieure à 5 mmh^{-1}), durée, forme du hyétoqramme avec son intensité maximale en 5 mn, pour deux pluies décennales de 70 et 100 mm. Ces données figurent sur le tableau ci-dessous.

P_{10j} mm	P corps mm	Durée mn	I_{max} en 5 mn mmh^{-1}
100	80,7	80	142
70	58,8	70	105

La figure 2 montre à titre d'exemple le hyétoqramme type du corps de la pluie décennale de 10 mm (traîne à faible intensité, petite averse préliminaire, et averses secondaires non représentées).

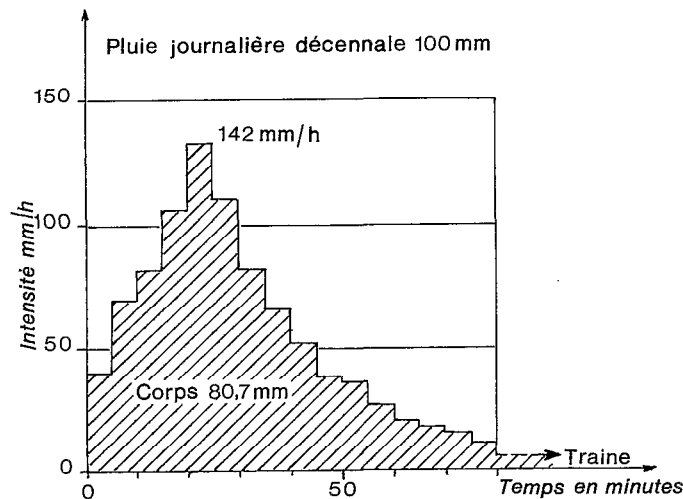


FIG. 2. — Hyétoqramme type du corps de l'averse principale

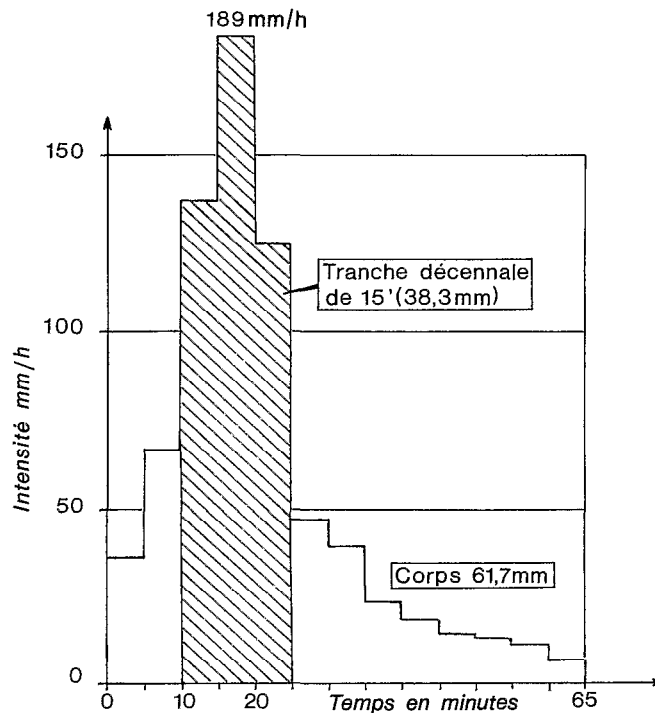


FIG. 3. — Site à pluie journalière décennale 100 mm

Les très petits bassins versants à pente forte ou assez forte ont des temps de concentration très courts. En conséquence, et pour certains bassins, on a dû considérer des averses dont les tranches d'intensité de 15 mn ou de 30 mn présentent la fréquence décennale pour des régions correspondant aux pluies décennales journalières de 100 et 70 mm. Ces tranches de 15 mn ou 30 mn doivent être « étoffées » car si elles étaient isolées, leur fréquence serait inférieure à la fréquence décennale, et les pertes initiales conduiraient à une pointe de crue trop faible. Trop « étoffées » elles présentent une fréquence également inférieure à la fréquence décennale. Sur la figure 3, on trouvera le choix qui a été fait pour une tranche décennale de 15 mn dans une région où $P_{10j} = 100$ mm.

4.3.2.2 Caractéristiques de l'hydrogramme composé

Méthode d'estimation

Les plus importantes caractéristiques sont T_{b2} et α_2 . On arrive à une estimation sommaire de T_{b2} en tenant compte de la durée du corps, mais pour déterminer α_2 , il faut une bonne estimation de T_{b2} , du volume de la crue V_{r10} et du débit maximal. Il faut donc construire l'hydrogramme composé.

Certaines caractéristiques de pente ou d'infiltrabilité P_i pourraient conduire à des valeurs très fortes ou très faibles de α_2 . Il fallait donc explorer tout le champ de variations des quatre facteurs principaux : S , $I_{g_{cor}}$, P_i , et P_{10j} , en éliminant l'influence d'autres facteurs généralement secondaires.

C'est pourquoi, au lieu d'établir l'hydrogramme composé pour les bassins représentatifs observés, nous avons considéré une large série de bassins fictifs pour lesquels l'hydrogramme composé a été construit par une série d'opérations résumées dans l'organigramme suivant :

On choisit certaines valeurs

Superficie du bassin S ($\approx 1,5$ à 10 km^2)
 VALEURS Indice de pente $I_{g_{cor}}$ (60 à 3 m km^{-1})
 CHOISIES Infiltrabilité : P_4 , P_3 , P_2
 Pluie décennale 70 mm ou 100 mm

VALEURS DÉDUITES	<p><i>On en déduit d'autres valeurs</i></p> <p>Temps de montée unitaire T_{m1} (d'après 4.3.1.2.)</p> <p>Temps de base unitaire T_{b1} (d'après 4.3.1.3.)</p> <p>Coefficient de ruissellement global (d'après 4.2.)</p>
VALEURS IMPOSÉES	<p><i>On impose certaines valeurs</i></p> <p>(en tenant compte des valeurs ci-dessus)</p> <p>Caractéristiques de la pluie</p> <p>Forme du hétérogramme, durée et hauteur du corps, traîne...</p> <p>Forme de l'hydrogramme unitaire, avec $\alpha = 2,5$</p> <p>Pluie d'imbibition et variations de K_r au cours de l'averse.</p>
RÉSULTATS	<p><i>On compose les hydrogrammes unitaires</i></p> <p>pour en déduire un hydrogramme décennal et en particulier certaines caractéristiques :</p> <p>Débit de pointe Q_{max}</p> <p>Temps de montée T_{m2} et temps de base T_{b2} (ou T_{b2t})</p> <p>Coefficient de pointe α_2</p>

La figure 4 illustre la méthode employée pour construire l'hydrogramme composé d'un bassin fictif.

Les bassins très perméables n'ont pas été pris en compte, car sur les bassins observés de cette catégorie la forme de l'hydrogramme n'a pas de signification. Pour les bassins avec une faible pente ($I_{g_{cor}}$ inférieur à 3 m/km) la pluie décennale est unitaire et il n'est pas nécessaire de composer les hydrogrammes.

Pour les bassins imperméables à forte pente on a étudié les crues pour des averses avec tranches de 15 à 30 mn décennales, car ce sont elles qui donnent la véritable valeur de Q_{10} .

Le détail des opérations avec des règles très strictes est donné par RODIER et RIBSTEIN (1988). Les valeurs imposées sont des valeurs déduites des études sur la pluviographie et de l'ensemble des résultats de recherches avec les

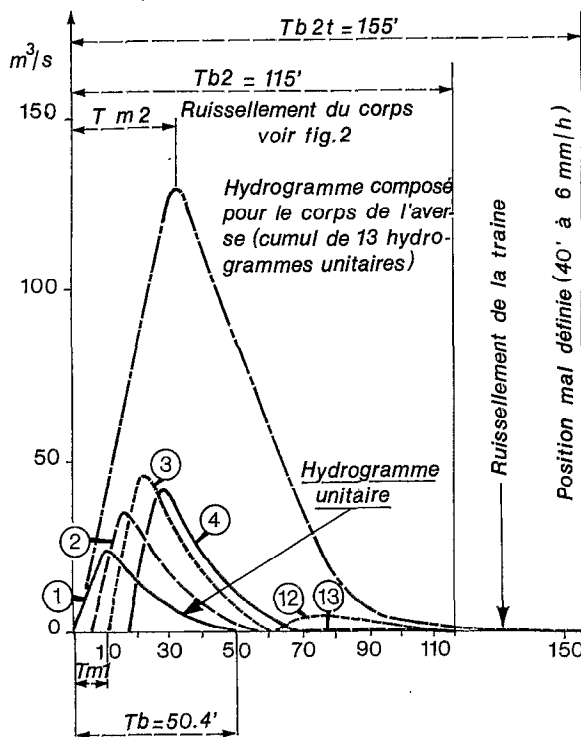


FIG. 4. — Hydrogramme fictif composé pour $S = 5 \text{ km}^2$, $I_{g_{cor}} = 60$, $P_2 P_{10} = 100 \text{ mm}$ (pluie journalière)

bassins représentatifs et le minisimulateur. La pluie d'imbibition P_{ib} que l'on soustrait des premières tranches du hétérogramme varie de 3 à 19 mm ; les coefficients de ruissellement des tranches successives de ce hétérogramme sont déduites des valeurs observées sur des bassins du même type : le maximum du coefficient de ruissellement peut dépasser 100 % (jusqu'à 115 %). La traîne peut ruisseler dans certains cas pour des intensités supérieures ou égales à 2 mmh^{-1} et dans ce cas, on a dû estimer un temps de base avec traîne T_{b2t} , T_{b2} restant le temps de base correspondant uniquement au corps d'averse (voir 4.3.2.2.4.).

Les valeurs imposées doivent respecter les valeurs choisies, et le volume total des tranches ruisselées doit être tel qu'il corresponde à la valeur globale de K_r déterminée par 4.2. Ces contraintes limitent beaucoup les choix de ces valeurs imposées.

Le tableau I donne les résultats pour quelques exemples intéressants.

Temps de montée (T_{m2})

Le maximum de l'hydrogramme composé se produit peu après le maximum de débit de la tranche de ruissellement maximal, laquelle suit d'assez près, en général, la tranche d'intensité maximale. Il en résulte que les résultats sont cohérents.

T_{m2} croît avec S et tend vers T_{m1} si $I_{g_{cor}}$ est inférieur à 15 m km^{-1} . L'influence de $I_{g_{cor}}$ est prépondérante, celle de l'infiltrabilité P_i est significative par suite de la réduction de la durée de la pluie efficace en terrain perméable. L'influence de P_{10j} est négligeable. Les courbes ont été tracées pour les diverses valeurs d'indice de pente. Ce sont des courbes légèrement convexes que nous avons remplacées par des droites, l'erreur en résultant est inférieure à 5 %. Les équations des droites sont les suivantes : (k_p facteur de réduction en terrains perméables).

TABLEAU I
Crucs décennales des petits bassins versants fictifs de 1 à 10 km^2
Averses journalières décennales de 100 mm et 70 mm

Type de bassin	Averse décennale	K_r %	P_{ib} mm	Hr. mm	T_{m1} mn	T_{b1} mn	T_{m2} mn	T_{b2} mn	T_{b2t} mn	α_1	α_2	α_p	Q_{10} m^3s^{-1}
$I_{g} 60 \text{ Imp. } 1,1 \text{ km}^2$ $P_{10} = 100 \text{ mm}$	24 h.	84	3,5	84	7,5	32	29	105	165	2,70	4,05	2,50	36,7
	tr. de 15'	79	3,5	59	7,5	32	21	89	119	3,49	4,54	3,37	41,1
$I_{g} 60 \text{ Imp. } 5 \text{ km}^2$ $P_{10} = 90 \text{ mm}$	24 h.	78	4,5	70	11,2	50	32	115	155	2,59	3,49	2,55	129
	tr. de 15'	73	4,5	50	11,2	50	20	100	120	3,39	3,99	3,27	139
$I_{g} 60 \text{ Imp. } 10 \text{ km}^2$ $P_{10} = 86 \text{ mm}$	24 h.	73	5,5	63	14	65	33	122	142	2,63	3,02	2,59	221
	tr. de 30'	71	5,5	56	14	65	32	118	129	2,91	3,16	2,89	227
$I_{g} 60 \text{ P. } 5 \text{ km}^2$ $P_{10} = 90 \text{ mm}$	24 h.	22	16	20	11,2	50,4	25	94	-	-	-	2,53	44,2
$I_{g} 7 \text{ Imp. } 5 \text{ km}^2$	24 h.	58	6	52	67	317	70	352	364	2,49	2,54	2,47	30,4
$I_{g} 3 \text{ Imp. } 5 \text{ km}^2$	24 h.	52		47	226	730	226	730		2,5		2,5	13,4
$I_{g} 60 \text{ Imp. } 1,1 \text{ km}^2$ $P_{10} = 70 \text{ mm}$	24 h.	78	3,5	54	7,5	32	28	93	126	2,64	3,42	2,49	26,3
	tr. de 15'	70	3,5	37	7,5	32	18	81	96	3,68	4,30	3,63	30
$I_{g} 60 \text{ Imp. } 5 \text{ km}^2$ $P_{10} = 59,5 \text{ mm}$	24 h.	72	4,8	45	11,2	50	31	103	118	2,57	2,87	2,51	92
	tr. de 30'	71	4,8	41	11,2	50	31	93	103	2,62	2,88	2,60	95
$I_{g} 60 \text{ R Imp. } 5 \text{ km}^2$ $P_{10} = 59,5 \text{ mm}$	24 h.	40	9,5	25,2	11,2	50	27	97		2,45		2,45	53
$I_{g} 60 \text{ P. } 5 \text{ km}^2$ $P_{10} = 59,5 \text{ mm}$	24 h.	18	17	11	11,2	50	22	84		2,40		2,40	27
$I_{g} 7 \text{ Imp. } 5 \text{ km}^2$ $P_{10} = 59,5 \text{ mm}$	24 h.	52	7	33	67	317	72	340		2,51		2,51	20
$I_{g} 7 \text{ R Imp. } 5 \text{ km}^2$ $P_{10} = 59,5 \text{ mm}$	24 h.	21,5	14	14	67	317		324		2,5		2,5	8,9

$I_{g_{cor}} = 60 \text{ m km}^{-1}$	$Tm2 = 0,45.S + 27,5 :$	Pour P4 :	$kp = 0,7$ pour $S = 1 \text{ km}^2$ $kp = 0,8$ pour $S = 5 \text{ km}^2$ $kp = 0,82$ pour $S = 10 \text{ km}^2$
$I_{g_{cor}} = 25 \text{ m km}^{-1}$	$Tm2 = 1,02.S + 33,8 :$	Pour P4 :	$kp = 0,72$ pour $S = 1 \text{ km}^2$ $kp = 0,82$ pour $S = 5 \text{ km}^2$
$I_{g_{cor}} = 15 \text{ m km}^{-1}$	$Tm2 = 1,02.S + 44 ;$	Pour P3 et P4 :	$kp = 0,85$ pour $S = 1 \text{ km}^2$ $kp = 0,95$ pour $S = 5 \text{ km}^2$
$I_{g_{cor}} = 7 \text{ m km}^{-1}$	$Tm2 = 2,5 .S + 60 :$	Pour P4 :	$kp = 0,9$ pour $S = 1 \text{ km}^2$ $kp = 0,92$ pour $S = 5 \text{ km}^2$

Dans ce dernier cas, $Tm2$ est très voisin de $Tm1$.

Temps de base ($Tb2 - Tb2t$)

$Tb2t$ (temps de base avec traîne) est très imprécis, puisque la durée de la traîne est difficile à étudier. Ce temps n'a été estimé que pour montrer comment on avait pu trouver des valeurs de α très élevées en 1965 ou dans certains rapports.

$Tb2$ seul utilisé dans la pratique est étroitement lié à la durée de la partie du corps qui ruisselle. Il varie avec les mêmes facteurs que $Tm2$, mais l'influence de Pi est plus grande.

Les courbes convexes représentant $Tb2$ en fonction de S ont pu être remplacées par des droites d'équations suivantes :

$I_{g_{cor}} = 60 :$	$P2 : Tb2 = 2,7 S + 97 ;$	$P4 : Tb2 = 2,3 S + 77$
$I_{g_{cor}} = 25 :$	$P2 : Tb2 = 4,1 S + 117 ;$	$P4 : Tb2 = 4,1 S + 101$
$I_{g_{cor}} = 15 :$	$P2 : Tb2 = 5 S + 139 ;$	$P4 : Tb2 = 5 S + 120$
$I_{g_{cor}} = 10 :$	$P2 : Tb2 = 8,9 S + 183 ;$	$P4 : Tb2 = 8,9 S + 165$
$I_{g_{cor}} = 7 :$	$P2 : Tb2 = 13,9 S + 225 ;$	$P4 : Tb2 = 19,6 S + 218$

Coefficient de pointe ($\alpha2, \alpha2t, \alpha2p$)

On ne traite pas ici du cas des tranches décennales de 15 ou 30 mn. On vérifie que $\alpha2t$ correspondant à $Tb2t$ varie de 2,7 à plus de 4, c'est l'influence du ruissellement de la traîne pour un indice de pente supérieur à 25 m/km et un indice de perméabilité $P2$. Dans pareils cas, on avait considéré pour déterminer $\alpha1$ des averses sans traîne ; pour $\alpha2$ on considère seulement la valeur de $Tb2$, même si la traîne ruisselle et dans ce cas, on prend pour $Vr10$ le volume de ruissellement global (y compris celui de la traîne et des averses secondaires). On vérifie, ce qui est très important, que $\alpha2$ est sensiblement constant ce qui permet d'adopter la valeur constante de 2,6.

4.4. DÉBITS DE LA CRUE DÉCENNALE

4.4.1. Débits de la crue décennale fournis par les bassins fictifs

Cette étude avait pour objet principal la détermination de $\alpha2, Tb2$ et $Tm2$; mais en plus cette analyse fournit un échantillon important de débits décennaux couvrant tout le champ de variations des divers facteurs. Les valeurs imposées sont susceptibles d'apporter des erreurs systématiques sur le débit maximum décennal $Q10$, mais les précautions prises en suivant de très près l'analyse des bassins représentatifs réduisent ces erreurs à un niveau faible par rapport à la précision recherchée.

4.4.1.1. Très petits bassins

Les différences entre les valeurs de $Q10$ calculées à partir d'averses avec tranches de 15 mn ou 30 mn décennales ou à partir de $P10j$ sont faibles. Avec les tranches de 15 ou 30 mn décennales, les majorations seraient les suivantes :

$I_{g_{cor}} = 60 \text{ m km}^{-1}$	P2, S = 1 km ²	Majoration 15 %	(valeur maximale)
$I_{g_{cor}} = 60 \text{ m km}^{-1}$	P3, S = 1 km ²	Majoration 8 % à 10 %	
$I_{g_{cor}} = 60 \text{ m km}^{-1}$	P2, S = 5 km ²	Majoration 8 %	(2 % pour P4)
$I_{g_{cor}} = 60 \text{ m km}^{-1}$	P2, S = 10 km ²	Majoration 5 %	(0 pour P4)

Pour $I_{g_{cor}} = 25 \text{ m km}^{-1}$ la majoration est nulle.

En pratique, on conservera le mode de calcul avec P10j. On affectera la valeur de Q 10 trouvée de la majoration correspondante.

Ceci ne serait pas applicable pour une superficie inférieure à 1 km².

4.4.1.2. Cas général

Cette étude montre toute la variabilité du débit spécifique Q10. Les données ci-dessous en donnent une première idée !

S = 1 km ²	P2	$I_{g_{cor}} = 60 \text{ m km}^{-1}$	Q10 = 33,4 m ³ /s km ² (P10j = 100 mm)
S = 1 km ²	P4	$I_{g_{cor}} = 7 \text{ m km}^{-1}$	Q10 = 1,3 m ³ /s km ² (P10j = 70 mm)
S = 10 km ²	P2	$I_{g_{cor}} = 60 \text{ m km}^{-1}$	Q10 = 22,1 m ³ /s km ² (P10j = 100 mm)
S = 10 km ²	P4	$I_{g_{cor}} = 7 \text{ m km}^{-1}$	Q10 = 0,4 m ³ /s km ² (P10j = 70 mm)

Pour une superficie 1 km², ces chiffres seraient à majorer comme indiqué ci-dessus. Pour 10 km², ils pourraient être majorés de 12 % pour un réseau radial ou réduits de 30 % pour un réseau en arête déportée.

En définitive, pour 1 km², Q10 peut varier dans un rapport de 30 à 1 et pour 10 km² dans un rapport de 85 à 1 et ceci sans tenir compte des terrains très perméables, des pentes très faibles et de la dégradation hydrographique, qui peuvent réduire encore Q10. Cette variabilité justifie un gros effort pour améliorer la méthodologie d'estimation de Q10.

Les forts débits du Sahel restent cependant en deçà des valeurs maximales mondiales (autour de 100 m³/s.km²), car si les intensités maximales sont fortes, elles ne sont pas exceptionnelles.

4.4.2. Débits de pointe décennaux des bassins représentatifs

On a suivi la même approche que ci-dessus pour réviser les valeurs de Q10 de 29 bassins représentatifs, mais dans ce cas, les valeurs choisies et déduites sont celles déterminées directement sur le bassin ainsi que α et la forme de l'hydrogramme. La pluie décennale est donnée par les cartes CIEH (LAHAYE, 1980). On a ajouté le débit retardé au débit maximum de ruissellement et tout a été mis en œuvre pour obtenir la meilleure estimation possible. Les résultats sont présentés sur le tableau II.

La comparaison des débits spécifiques a été faite en ramenant les débits à une même surface 10 km² :

Pour Kaouara réduit (Niger)	Q10 = 16,3 m ³ /s km ²	pour P10j = 100 mm
Pour Niamey VI (Niger)	Q10 = 1,8 m ³ /s km ²	pour P10j = 70 mm

Le rapport est voisin de 9, loin de la valeur 85 trouvée pour les bassins fictifs car cette valeur était due au fait que le champ de variations est beaucoup plus étendu avec des bassins imperméables à forte pente et perméables à faible pente. Pour le bassin de Bachikélé au Tchad (S = 19,8 km², région subdésertique, infiltrabilité P2, $I_{g_{cor}} = 29 \text{ m km}^{-1}$), on trouve Q10 = 21,8 m³/s km². En incorporant ce bassin à l'ensemble des 29 autres, pour une pluie de 100 mm et une superficie de 10 km², le rapport passe à 12.

4.4.3. Comparaison des valeurs obtenues pour les débits décennaux Q10

Dans la pratique de ce genre d'estimation il faut indiquer que deux chiffres qui s'écartent de 10 % correspondent à un bon accord ; ce n'est qu'à partir de différences de 25 % à 50 % qu'il convient de rechercher les causes de cet écart.

La comparaison pour un même bassin des débits des rapports originaux Q_{10R} et des débits Q_{10N} révisés en 4.4.2. montre que 13 sur 22 des valeurs révisées présentent des valeurs plus faibles que les anciennes. (On trouve deux écarts de - 47 % et - 39 %). On devrait en trouver davantage car les marges de sécurité prises autrefois étaient assez confortables ; c'est la cause principale de ces écarts, car les valeurs révisées de Kr (plus faible) et de Tbl (plus court) se compensent sensiblement. Mais deux autres facteurs tendent à augmenter les nouvelles estimations du débit décennal : valeurs de P10j plus fortes dans certains cas et calcul systématique de Q10 en début de saison des pluies.

TABLEAU II
Révision des débits maximaux de crues décennales Q 10 N et Q 10 S

Bassin	Pays	S km ²	Inf.	indice de pente I _g cor	Latitude	P10j. mm	Kr %	Q10 R m ³ s ⁻¹	Q10 N m ³ s ⁻¹	α	Q10 S m ³ s ⁻¹
Tikaré I	Burkina	0,11	P3	75	13°17'	91	23	(3)	(1,6)	-	-
Kount SS	Niger	0,27	P3	(50)	14°50'	72 (1)	49	6,9	6,7	-	-
In Tiz II	Niger	0,67	P2	61	17°09'	39 (2)	69	25	16	-	-
Ansouri	Burkina	0,69	P3	22	13°18'	91	24	8	6,4	-	-
Jalafanka	Burkina	0,81	P2	7	14°35'	79	61	6,7	7,6	2,6	6,4
Mogodé B	Cameroun	0,94	P3	30	10°35'	100	30	14	8,6	2,6	9,6
Niamey VI	Niger	1,0	P4	(10)	13°33'	91	17	-	5,4	2,6	4
Kolel	Burkina	1,05	P3	75	14°34'	58 (2)	32	19	15	-	-
Niamey - BAO Trésor	Niger	1,54	P5	9	13°31'	91	8	-	(6)	-	-
Sofoya V	Tchad	1,63	P2	20 ?	16°04'	61	51	-	(21)	2,6	15,8
In Tiz I	Niger	1,87	P2	25	17°09'	54	68	36	30	2,6	28
Tikaré II	Burkina	2,36	P3	(40)	13°17'	91	17	18,5	13,8	2,6	15,9
Kaouara réduit	Niger	2,5	P2	18	14°06'	84	68	50	48,4	3 (4)	50
Diam Nadié	Sénégal	2,6	P2	10,8	14°44'	99 (5)	42	15,5	17,8	2,6	24,9
In Azena	Niger	2,6	P2	27	17°09'	54	60	-	26	2,6	27,5
Pô	Mauritanie	2,7	P2	12,8	15°47'	99	62	-	41,5	2,3 (3)	36,4
Bodéo	Burkina	3,45	P2	6,6	14°08'	84	56	-	(25)	2,6	24
Bouloré	Cameroun	3,75	P2	58	10°38'	105	45	55	62	2,6	68
Kereng	Cameroun	4	P2	37	9°49'	77 (1)	49	60	63	2,6	62
Leleng	Cameroun	4	P3	45	10°43'	105	33	55	53	3 (4)	48,4
Kourien-Doulien	Tchad	7,8	P2	73	17°09'	52	39	(40)	(34)	2,6	35,6
Sinkoroni DSP	Mali	8,9	P3	18	13°53'	93	16	40	36,5	2,6	-
Sinkorini FSP	Mali	8,9	P3	18	13°53'	93	27	40	50	2,6	51
Polaka	Burkina	9,14	P3	15,5	14°35'	79	27	46	55,5	1,9 (3)	49,3(6)
Tchalol	Burkina	9,28	P2	15	14°34'	79	49	44	55,6	2,6	53,9
Oued Ali	Mauritanie	10,4	P3	15	17°48'	80	37	70	65	2,4 (3)	63,5
Taraïman	Tchad	11,2	P2	3	14°34'	83	49	17,5	17,2	2,6	16,2
Abou-Goulem	Tchad	12,3	P4	22	15°35'	93	18	40	50,2	2,6	47,2
Outardes	Burkina	16,5	P2	7,2	14°35'	79	42	40	51,2	-	43

(1) Tranche de 30' décennale. (2) Tranche de 15' décennale. (3) Correction de α pour arête de poisson déportée.

(4) Correction de α pour réseau radial. (5) Implantation du bassin supposée continentale. (6) Bassin réduit : S = 6,9 km².

Dans la dernière colonne du tableau II, nous avons présenté les valeurs Q_{10S} du débit de crue décennale de ces bassins représentatifs, telles qu'elles seraient calculées pour des bassins non observés, le temps de base (T_b) et le coefficient de pointe (α) étant déterminés suivant les indications fournies aux paragraphes 4.3.1. et 4.3.2., tout en respectant les consignes données dans le questionnaire. La comparaison des valeurs de Q_{10S} et Q_{10N} donne une idée de l'efficacité de la méthodologie en ce qui concerne T_b et α, mais non en ce qui concerne Kr. Les résultats sont acceptables dans 86 % des cas avec des écarts qui ne dépassent pas 15 %. Seuls trois bassins ont un écart plus grand ; l'écart maximum de 40 % est obtenu pour un bassin très cultivé (Diam Nadié) pour lequel le temps de base correspondant à Q_{10N} est obtenu en pleine saison des pluies, aucune crue de début de saison des pluies n'ayant pu être observée ; les deux autres bassins (Niamey VI et Sofoya V) avec des écarts dépassant 25 % ont des caractéristiques physiques insuffisamment connues pour une application correcte de la méthodologie proposée.

5. ÉTUDE DE SENSIBILITÉ DE LA MÉTHODOLOGIE PROPOSÉE

A partir des valeurs de débit décennal Q₁₀ calculées pour les bassins fictifs, il est possible d'étudier séparément l'influence de chaque caractéristique explicative : superficie S, indice de pente global I_gcor, classe de perméabilité Pi et valeur de la pluie décennale journalière P10j.

On ne peut pas écrire des équations analytiques reliant Q₁₀ à ces caractéristiques. Par exemple la superficie intervient dans le calcul du coefficient d'abattement, des caractéristiques de l'hydrogramme instantané (temps de montée et temps de base), du coefficient de ruissellement global, et dans la détermination de l'hydrogramme composé. En conséquence, nous proposons une approche empirique pour cette étude de sensibilité ; cette approche doit permettre de répondre à certaines questions du type : comment varie Q₁₀ quand S augmente ?

TABLEAU III
Erreurs maximales sur le débit décennal

Paramètre	Erreur plausible	Erreur relative maximale $\Delta Q/Q$	Commentaires
P10j. ponctuel	30 mm (de 70 à 100 mm)	87 %	S = 10 km ² I _g cor. = 7 mKm-1 Sol perméable
S	100 % (de 5 à 10 km ²)	71 %	P10j. = 100 mm I _g cor. = 60 mKm-1 Sol imperméable
I _g cor.	100 % (de 3 à 6 mKm-1)	197 %	P10j. = 70 mm S = 10 km ² Sol relativement imperméable P3
Infiltrabilité	de 1 classe d'infiltrabilité (de R Imp à Imp)	231 %	P10j. = 100 mm S = 10 km ² I _g cor. = 3 mKm-1

Il serait trop long de présenter dans le détail les résultats de cette approche empirique, mais les valeurs importantes sont données dans le tableau III.

Les paramètres sont classés dans ce tableau par ordre de difficulté croissante d'estimation. Ces valeurs appellent plusieurs commentaires :

— Q10 augmente moins vite que S, et l'erreur est maximale alors que les bassins ont une forte pente. Ce résultat est rassurant, car plus les bassins sont pentus, plus l'estimation de S peut se faire avec précision ;

— une incertitude sur I_g provoque une forte incertitude sur le débit lorsque la pente est faible. Ce commentaire peut être complété par la figure 5 donnant l'erreur relative sur Q10 en fonction des valeurs de l'indice de pente. Toutes les courbes présentent une cassure vers un indice de pente de 10 m/km ce qui a aussi été observé dans l'étude des relations entre le coefficient de ruissellement et l'indice de pente global ;

— l'erreur la plus forte sur Q10 est due à une erreur d'une classe de perméabilité. Il faut donc accorder une grande importance à cette classification qui peut être grandement facilitée par le catalogue des états de surface (CASENAVE et VALENTIN, 1988).

Mais le tableau III ne présente pas l'influence du questionnaire. Or 14 des 29 bassins qui ont servi à mettre au point la méthode ont fait l'objet de corrections grâce à l'emploi de ce questionnaire. Sur cet échantillon aucune correction ne dépasse 50 % mais toute la gamme des particularités des bassins versants n'est pas représentée. Par exemple, sur certains bassins observés de la Maggia au Niger, on trouve des corrections de 140 % par l'emploi du concept de bassins fictifs.

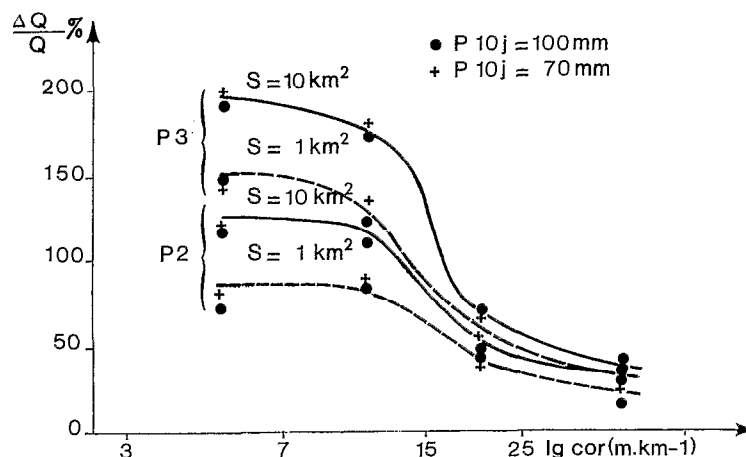


FIG. 5. — Variation relative du débit décennal ($\Delta Q/Q$) en fonction de l'indice de pente corrigé I_gcor (pour une variation $\Delta I_g/g$ de 100 %)

La check list permet de mieux cerner les estimations de ces paramètres. Il s'agit donc d'un garde-fou contre les erreurs liées aux estimations, mais aussi contre les erreurs liées à la méthodologie.

CONCLUSION

Cette étude a permis de se dégager de certaines hypothèses simplistes liées au modèle global : prise en compte d'une pluie journalière complète au lieu d'un hyétogramme trop simplifié, prise en compte du développement de la couverture végétale par le choix de l'époque de P10j (début de la saison des pluies), emploi du concept du bassin réduit (grâce au questionnaire) apportant une solution au cas de certains bassins hétérogènes.

La quantification de l'infiltrabilité n'a pas progressé par cette étude, mais le répertoire : « Les états de surface de la zone sahélienne » (CASENAVE et VALENTIN, 1988) apporte une solution qui permettra d'améliorer nos conclusions.

Des progrès sensibles ont été réalisés dans la connaissance des caractéristiques de forme des hydrogrammes. Il est possible de déterminer ces caractéristiques grâce aux paramètres pris en compte dans le questionnaire. Sous réserve de l'emploi de ce questionnaire, il est possible d'utiliser un coefficient de pointe constant.

Enfin, on a pu apprécier l'influence des erreurs d'estimation des paramètres sur la valeur du débit de crue décennal. Mais, au Sahel, beaucoup reste à faire principalement pour la recherche de nouvelles méthodologies qui tiennent mieux compte de l'hétérogénéité et pour trouver une solution aux problèmes de dégradation hydrologique.

On a pu aussi apprécier au cours de ces recherches les difficultés qu'allait rencontrer la révision des procédés de calcul dans les zones plus humides.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 24 octobre 1988

BIBLIOGRAPHIE

- BOUVIER (C.), 1985. — Etude du ruissellement urbain à Niamey. Rapport Général. Tome 3. Interprétation des données. *Multigraph. CIEH. Mission ORSTOM au Niger*, 106 p.
- CASENAVE (A.), VALENTIN (C.), 1988. — Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Communauté Economique Européenne. ORSTOM 202 p. + annexes + planches photographiques. ORSTOM, Paris.
- CHEVALIER (P.), CLAUDE (J.), POUYAUD (B.), BERNARD (A.), 1985. — Pluies et crues au Sahel. *Hydrol. de la Mare d'Oursi (1976-1981)*. ORSTOM, Paris, 251 p.
- DUBREUIL (P.), 1965. — Contribution à l'étude d'implantation de bassins représentatifs de régions hydrologiques homogènes. Colloque AISH. Bassins représentatifs et expérimentaux. Budapest. 54-63. *Publication AISH n° 66*.
- DUBREUIL (P.), CHAPERON (P.), GUISCAFRE (J.), HERBAUD (J.), 1972. — Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux de l'ORSTOM. Années 1951-1969. ORSTOM, Paris, 916 p.
- IBIZA (D.), 1987. — Transferts de surface. Etude du temps caractéristique (temps de concentration) sur des bassins en zone inter-tropicale de 2 à 2 000 km². *Hydrol. continent.*, vol. 2, n° 2 : 101-115.
- LAHAYE (J.P.), 1980. — Etude des pluies journalières de fréquence rare dans les Etats-membres du CIEH. Synthèse régionale des valeurs réduites des pluies maximales annuelles. Aspects théoriques. CIEH. Rapport multigraph. CIEH. Ouagadougou. 58 p et annexes.
- LE BARBE (L.), 1982. — Etude du ruissellement urbain à Ouagadougou. Essai d'interprétation théorique. *Cah. ORSTOM. Sér. hydrol.* Vol. XIX, n° 3 : 135-204.
- POUYAUD (B.), 1986. — Contribution à l'évaluation de l'évaporation de nappes d'eau libres en climat tropical sec. *Etudes et Thèses*, ORSTOM, Paris, pp. 254.
- PUECH (C.), CHABI GONNI (D.), 1984. — Méthode de calcul des débits de crue décennale pour les petits et moyens bassins versants d'Afrique de l'Ouest et Centrale. CIEH, Rapport *Multigraph. CIEH*. Ouagadougou. 73 p. et annexes.
- RODIER (J.A.), 1982. — La transposition des résultats des bassins représentatifs et ses problèmes. *Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol.* Vol. XIX, n° 2 : 115-127.
- RODIER (J.A.), 1984-1985. Caractéristiques des crues des petits bassins versants représentatifs au Sahel. *Cah. ORSTOM Sér. Hydrol.* Vol. XXI, n° 2, 25 p + annexes.
- RODIER (J.A.) AUVRAY (C.), 1965. — Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique Occidentale. CIEH. ORSTOM, Paris, 30 p. Translated in english by HERRIDGE (WE) 1965. (multigraph. CIEH. Ouagadougou).
- RODIER (J.A.), RIBSTEIN (P.), 1988. — Estimation des caractéristiques de la crue décennale pour les petits bassins versants au Sahel couvrant de 1 à 10 km². ORSTOM, Montpellier, 133 p.
- SEGUIS (L.) 1986. — Recherche pour le Sahel d'une fonction de production journalière (lame précipitée-lame écoulée) et sa régionalisation. Thèse de doctorat. Université des Sciences et Techniques du Languedoc. 326 p.
- VUILLAUME (G.), 1974. — L'abattement des précipitations journalières en Afrique intertropicale. Variabilité et précision de calcul. *Cah. ORSTOM Sér. Hydrol.* Vol. XI, n° 3 : 205-240.