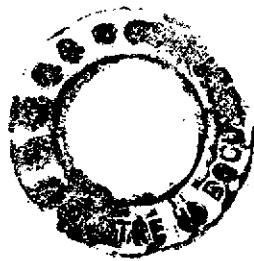


COMITE INTERAFRICAIN
D'ETUDES HYDRAULIQUES

CIEH

1106531
ECOLE INTER ETAT D'INGENIEURS
DE L'EQUIPEMENT RURAL

EIER



**NOTE SUR LE DIMENSIONNEMENT
DES OUVRAGES EVACUATEURS DE CRUES
EN AFRIQUE DE L'OUEST SAHELienne
OU TROPICALE**

JM. GRESILLON

P. HERTER

J.P. LAHAYE



NOTE SUR LE DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES
EVACUATEURS DE CRUES EN
AFRIQUE DE L'OUEST SAHELIERNE
OU TROPICALE

==OO==

Par Jean Michel GRESILLON
Patrick HERTER
et Jean Pierre LAHAYE

+ +

L'objet de cette note est de faciliter le dimensionnement des ouvrages évacuateurs de crue, principalement ceux des barrages. On sait que l'on doit procéder pour cela aux deux opérations : détermination de la crue dont on veut protéger l'ouvrage et étude de l'effet de laminage provoqué par la réserve sur la crue en question.

Pour les petits bassins sur lesquels on n'a aucun relevé hydrologique, l'ingénieur chargé d'étudier des barrages en Afrique de l'Ouest ne dispose à l'heure actuelle que de l'importante étude due à MM. RODIER & AUVRAY : "Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique Occidentale" (15) (*) il choisit ensuite un coefficient majorateur permettant de protéger son ouvrage contre une crue d'une durée de retour supérieure à dix ans ; il a enfin à sa disposition des méthodes - généralement graphiques et délicates - pour évaluer l'effet d'écrétage dû à la réserve.

Nous nous proposons ici de reprendre chacune de ces trois étapes afin de :

- Simplifier l'utilisation de la méthode proposée par l'O.R.S.T.O.M. pour la détermination des crues décennales. Par cette simplification nous souhaitons non pas fournir au projeteur une norme de calcul qu'il suivrait aveuglément sans en mesurer la portée mais plutôt permettre aux utilisateurs une plus grande disponibilité pour apprécier les facteurs hydrologiques, notamment deux dont la

.../...

(*) - Les chiffres entre parenthèses renvoient à la bibliographie en fin de note.

méthode ne tient pas compte explicitement (forme du bassin, nature plus ou moins dégradée du lit) etc...). A cet égard, nous rappelons la conclusion de MM. RODIER et AUVRAY "Les recettes que l'on a données dans la présente note doivent être appliquées avec beaucoup de jugement et un examen sérieux du terrain et en particulier du réseau hydrographique, qui fournira des recoupements non inutiles".

- Discuter la valeur du coefficient majorateur à appliquer à la crue décennale ainsi calculée pour obtenir un ordre de grandeur de la crue de projet.

- Fournir des résultats sur abaque, relatifs au laminage, permettant d'évaluer très rapidement son effet ; l'expérience nous a en effet montré que celui-ci est bien souvent négligé et que lorsqu'il ne l'est pas, il est parfois évalué de manière incomplète.

1. LA CRUE DECCENNALE

1.1. - METHODE

Rappelons brièvement que la méthode de Messieurs RODIER et AUVRAY estime la crue décennale à partir de la pluie décennale de vingt quatre heures P_{10} . Un coefficient d'abattement A dépendant de la surface du bassin, permet de calculer le volume précipité sur le bassin dont la surface S est connue. Les auteurs fournissent un coefficient de ruissellement pour la crue décennale K_r , qui dépend du régime climatique, de la pente moyenne, de la perméabilité et de la surface du bassin ; ils indiquent également quel est le temps t_b d'écoulement pour cette crue décennale ; il dépend également du régime climatique, de la pente et de la surface du bassin.

$$\text{Le débit moyen de la crue est : } \frac{P_{10} \times A \times S \times K_r}{t_b}$$

A ce débit moyen est appliqué un coefficient majorateur K tenant compte de la forme de l'hydrogramme. Ce coefficient majorateur est fonction également du régime climatique et de la surface du bassin.

Les paramètres retenus comme déterminants sont donc :

- Le régime climatique : il est caractérisé par les trois régimes :
 - Sahélien : pluie annuelle inférieure à 800 mm

- Tropical : pluie annuelle supérieure à 800 mm tant que la végétation est celle de la savane.
 - Equatoriaux ou Forestiers : (les renseignements fournis pour cette catégorie étant plus sommaires, nous ne nous y attacherons pas).
- Les pentes moyennes des bassins : elles sont estimées en mesurant la pente de la partie médiane du bassin après avoir éliminé les 20 % de la partie supérieure et les 20 % de la partie inférieure du profil en long (ou en travers suivant le cas).

Les pentes sont classées en catégories R :

- R_1 pentes très faibles, inférieures à 1 à 2 ‰
- R_2 pentes faibles, inférieures à 5 ‰
- R_3 pentes modérées comprises entre 5 ‰ et 1 %
- R_4 pentes assez fortes : longitudinales entre 1 et 2 % transversales supérieures à 2 %
- R_5 pentes fortes : longitudinales entre 2 et 5 % transversales entre 8 et 20 %
- R_6 pentes très fortes : longitudinales supérieures à 5 %

Les catégories R_2 , R_3 et R_4 sont les plus courantes.

- Les perméabilités des bassins : elles sont également définies par catégories P :

- P_1 bassins rigoureusement imperméables (roche ou artigiles)
- P_2 bassins imperméables avec quelques zones perméables de faible étendue ou bassins homogènes presque imperméables.
- P_3 bassin assez imperméable avec des zones perméables d'étendue notable ou bassins homogènes assez peu perméables.

.../...

- P_4 bassins assez perméables (exemple : zone de décomposition granitique avec abondance d'arène).
- P_5 bassins perméables : sable ou carapace latéritique très fissurée.
- La surface du bassin versant
- La pluie décennale de vingt quatre heures du lieu : elle varie pour les zones envisagées (sahéliennes et tropicales) entre les limites : 70 mm et 130 mm.

1.2. - ABAQUES

Nous avons calculé en supposant que la pluie de vingt quatre heures du lieu est égale à 100 millimètres, les débits de crues décennales obtenues à l'aide de la méthode précédemment rappelée (les coefficients d'abattement adoptés n'étant pas ceux proposés par RODIER & AUVRAY mais ceux résultant d'une étude plus récente - voir paragraphe 1.4.).

On a ainsi tracé des abaques (figures 1, 2, 3) qui, pour les trois pentes R_2 , R_3 et R_4 , donnent les débits en fonction de la surface des bassins, ceci pour diverses perméabilités de terrain, et dans les deux cas Sahélien et Tropical. Soit Q_{10} le débit lu sur ces abaques.

Si la pluie décennale de vingt quatre heures du lieu est égale à $P_{10 \text{ mm}}$, la valeur de la crue à considérer est alors :

$$Q_{10} = Q_{10} \frac{P_{10 \text{ mm}}}{100}$$

1.3. - REMARQUES SUR LE TRACÉ

- On a parfois fait disparaître quelques irrégularités du tracé (notamment $R_2 P_2$ et $R_3 P_2$ sahélien).

- Pour le régime Sahélien, Messieurs RODIER & AUVRAY ne donnent leurs coefficients de ruissellement que jusqu'à des surfaces de bassins égales à

Pentes R2

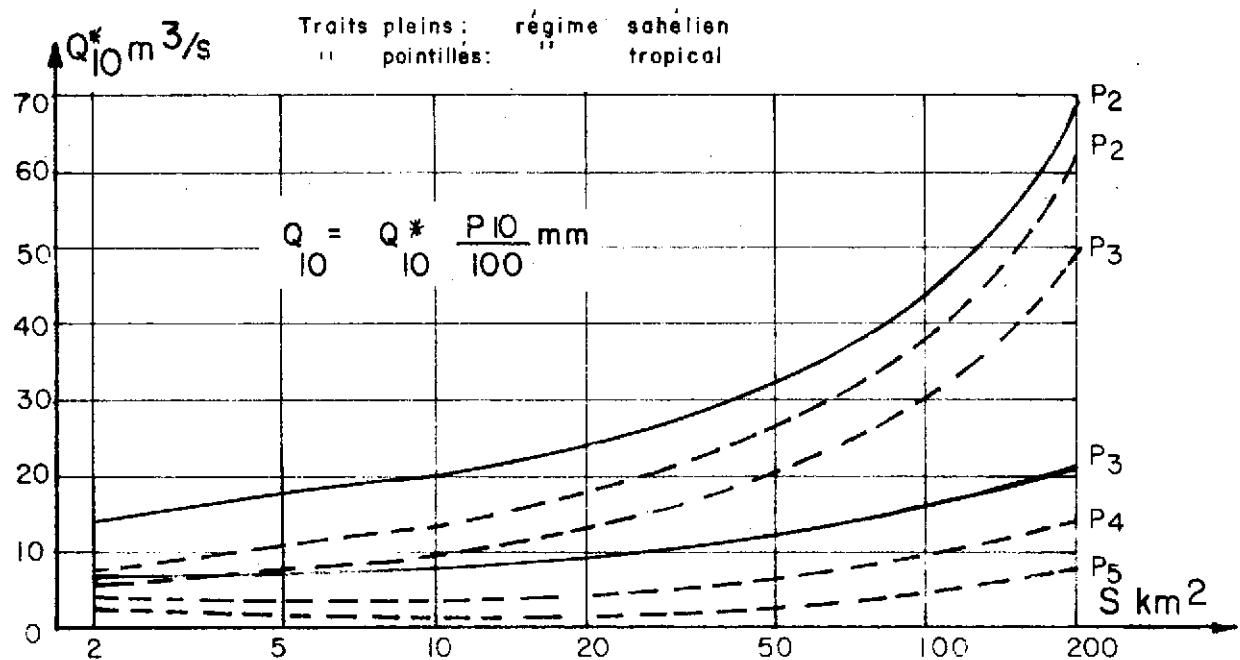


Fig:1 Débit décennal pour une pluie décennale de 100mm et pour des pentes R2.

Pentes R3

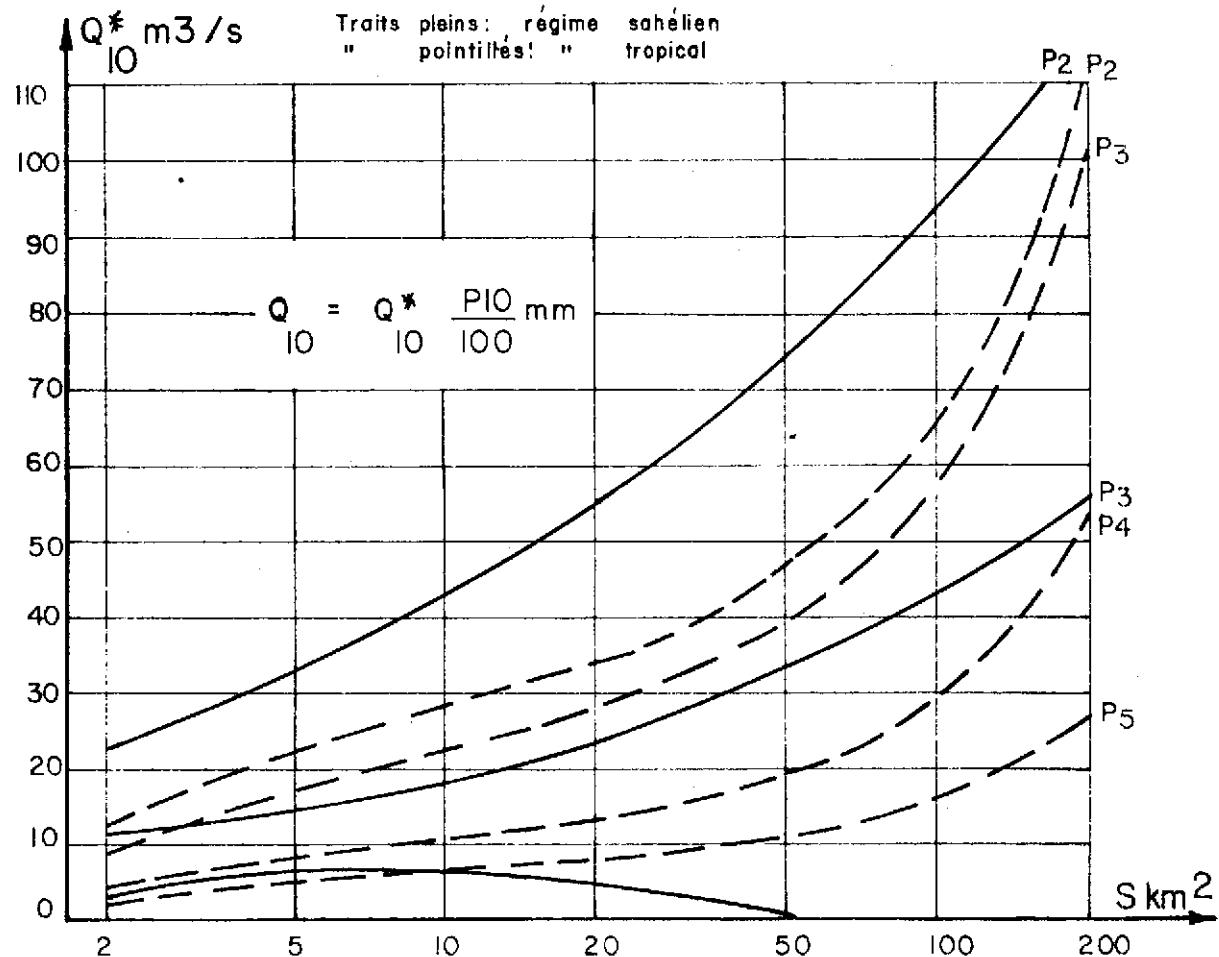


Fig:2 Débit décennal pour une pluie décennale de 100mm et pour des pentes R3

Pentes R4

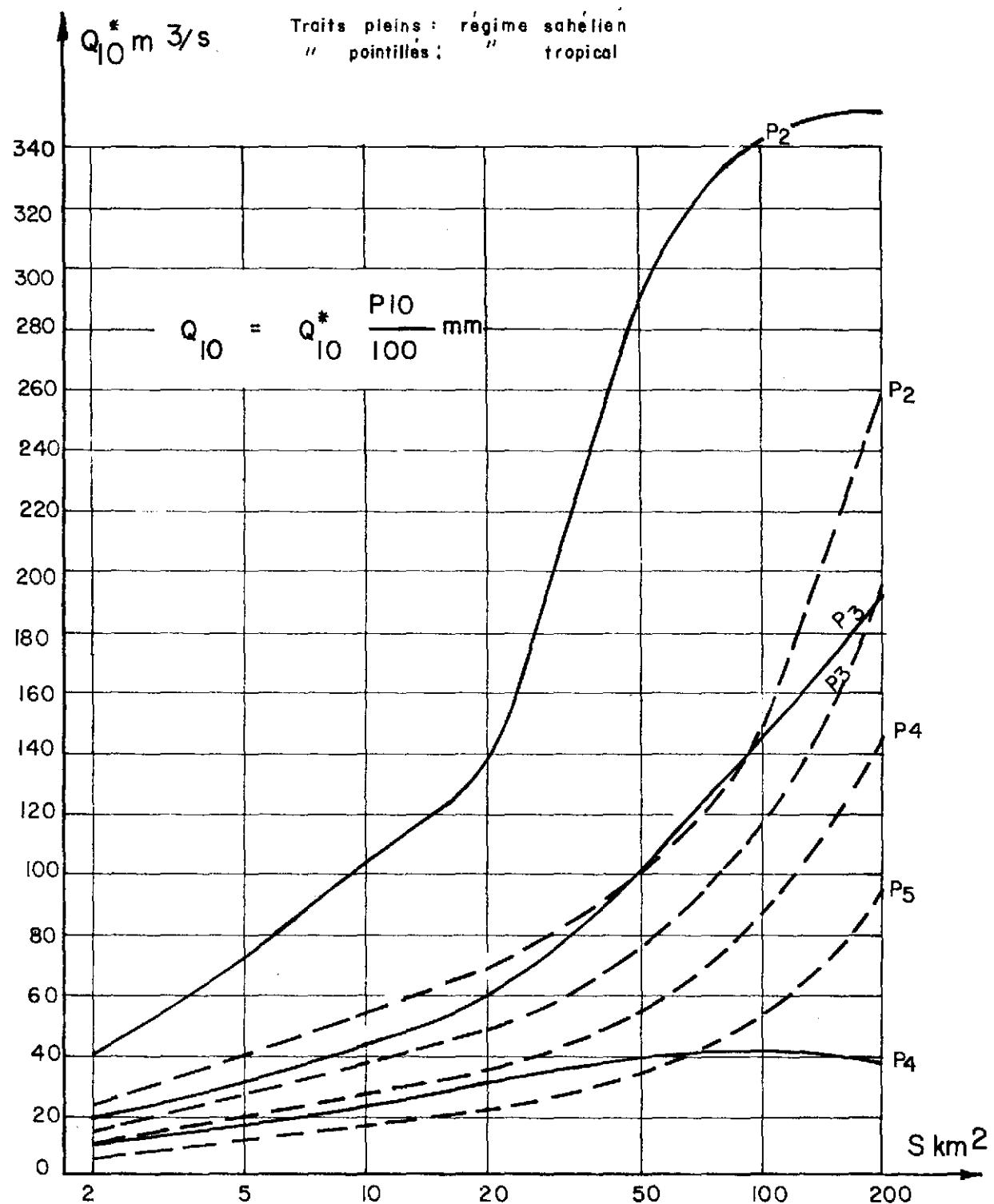


Fig:3 Débit décennal pour des pentes R4 et une pluie décennale de 100 mm.

120 km². Au delà de cette valeur, ils suggèrent que la variation du débit avec la surface est linéaire, la borne 200 km² étant fournie dans chaque cas. Cette borne est indépendante de la valeur P_{10} de la pluie décennale du lieu (c'est celle qui figure sur les courbes). L'utilisation de nos abaques telle que nous l'avons indiquée signifie qu'au contraire la crue du bassin de 200 km² est fonction de la pluie du lieu. Mais il n'est peut-être pas tout à fait injustifié de prendre cette petite liberté par rapport aux auteurs. On peut d'ailleurs facilement se ramener à la méthode qu'ils indiquent.

- Pour le régime Sahélien toujours, les valeurs du coefficient K caractéristique de la forme de l'hydrogramme dépendent de la surface du bassin mais aussi de la "qualité" du ruissellement. La note de l'O.R.S.T.O.M. propose pour les bassins "ruisselant particulièrement bien" des valeurs plus importantes de ce coefficient. Ainsi, comme il est suggéré dans cette note on a utilisé dans nos courbes les valeurs fortes du coefficient K pour les seuls bassins qui se classent dans la catégorie R₄ P₂. Il faut souligner toutefois que certains bassins du type R₃ P₂ ou R₄ P₃ peuvent si leur réseau de ruissellement est particulièrement bien net et bien ramifié, mériter aussi une telle majoration. Celle-ci revient à multiplier les débits par 1, 2 si la surface est inférieure à 25 km², par 1, 5 si la surface est de 50 km², par 1, 3 si elle est de 100 km². Notons que l'emploi de ces coefficients K majorés amène à un tracé contestable : la majoration n'est pas prévue pour les bassins de 200 km²; le débit spécifique reste pratiquement constant pour des surfaces comprises entre 20 et 50 km², il est divisé par 2 entre les surfaces 100 et 200 km². (voir R₄ P₂ sahélien sur nos graphiques).

- En régime tropical, pour les catégories de pentes R₂ et R₃, il semble que l'étalement des valeurs des débits de crues avec les perméabilités des terrains n'est pas bonne. On trouve en effet les catégories P₂ et P₃ bien proches, de même pour les catégories P₄ et P₅; la différence entre les catégories P₃ et P₄ étant par contre probablement exagérée.

- Si l'on compare les débits de crues en régime sahélien et en régime tropical, à égalité de pluie décennale, bien entendu, on constate que les valeurs les plus fortes sont obtenues dans les bassins sahéliens si les sols sont peu perméables et au contraire dans les bassins tropicaux si les sols sont perméables. Cette différence tout à fait logique, due en particulier à l'effet de la

... / ...

végétation, fait que les bassins sahéliens sont nettement plus sensibles à l'effet de la perméabilité des sols que les bassins tropicaux ; compte tenu de la difficulté de classer les bassins dans leur catégorie P, on constate ainsi que l'évaluation des débits des crues est moins bonne en régime sahélien qu'en régime tropical.

1.4. - REMARQUES SUR L'EMPLOI DE LA METHODE

1.4.1. - Choix des paramètres :

On a vu que l'emploi de la méthode suppose connus cinq paramètres. Chacun d'eux n'est pas connu avec le même degré de précision.

- Pluie décennale du lieu P_{10}

La pluie décennale ponctuelle est relativement bien connue partout en Afrique de l'Ouest grâce en particulier aux publications communes O.R.S.T.O.M. - C.I.E.H. (2). Pour calculer la pluie moyenne sur le bassin versant on applique à la pluie ponctuelle un coefficient d'abattement A. D'après les résultats d'une étude statistique sommaire, RODIER & AUVRAY ont pu proposer une série de valeurs de A en fonction de la surface. Plus récemment, VUILLAUME (17) a proposé une formule définissant le coefficient d'abattement A en fonction de la durée de retour r de la pluie considérée (années), de la pluviométrie annuelle P (mm) et de la surface S du bassin (km^2) :

$$A = 1 - 0.001 (9 \lg_{10} r - 0.042 P + 152) \lg_{10} S$$

C'est cette formule qui a été adoptée dans les calculs de cette note ; en remarquant que le coefficient d'abattement varie assez peu en fonction de la pluviométrie annuelle P, nous avons retenu les formules suivantes (avec $r = 10$ ans).

$$A = 1 - 0.136 \lg_{10} S \text{ en zone sahélienne et sud désertique} \\ (\text{P moyen } 600 \text{ mm})$$

$$A = 1 - 0.111 \lg_{10} S \text{ en zone tropicale (P moyen } 1\,200 \text{ mm}).$$

Remarque *

La formule précédente repose sur une base expérimentale plus importante que ce dont on disposait dans les études antérieures : à ce titre elle permet de

dégager l'influence de paramètres tels que pluviométrie annuelle et durée de retour de la pluie mais d'une manière probablement moins précise que ne le suggère sa formulation.

- Le régime climatique :

La frontière entre les régimes sahéliens et tropicaux est théoriquement bien nette et fixée par la pluviométrie moyenne annuelle. Mais la frontière des 800 mm est trop rigide et le choix du régime sahélien ou tropical est en fait plus ambigu. Il est préférable de considérer que la frontière est comprise entre 700 mm et 900 mm (comme en attestent certains bassins de Haute-Volta). C'est d'ailleurs dans ces régions particulièrement que, d'après RODIER et AUVRAY, se situent les bassins "Sahéliens" aux hydrogrammes pointus dont on a déjà parlé.

- Les Pentes :

Quoique la règle consistant à éliminer dans les profils les 20 % amont et les 20 % aval soit quelquefois difficile à respecter dans la pratique avec les données topographiques dont on dispose, le classement des bassins dans une catégorie R ne souffre en général pas d'une grosse incertitude. C'est une chose heureuse d'ailleurs, le classement dans une catégorie de pente est en effet le plus important dans la majorité des cas ; la pente est un paramètre essentiel. (Voir figure 1, 2 et 3) mais l'importance du paramètre pente nécessite en particulier de ne pas oublier que la précision apparente des valeurs des débits décennaux obtenus est illusoire, le passage d'une catégorie R à une autre étant évidemment progressif.

- Les perméabilités :

La détermination de la catégorie P est celle qui s'effectue malheureusement avec la plus grande incertitude. Il est en effet difficile de classer qualitativement les sols de tout un bassin versant sur une échelle peut-être trop étalée. Quand un bassin est-il "assez imperméable" (P_3), quand est-il "assez perméable" (P_4) ? Or une erreur dans la détermination de la catégorie P, (même si elle est en moyenne moins grave que la détermination de la catégorie R) entraîne une erreur relative sur le débit souvent égale à 100 % et parfois plus.

.../...

- La surface du bassin versant :

Théoriquement bien connue également, elle nécessite toutefois pour les petits bassins en particulier, de ne pas se limiter à une détermination sur carte au 1/200.000e.

Rappelons d'autre part, que dans l'étude des bassins de surfaces grandes ou moyennes, il importe d'analyser les divers affluents dont les surfaces peuvent être beaucoup plus petites mais les pentes beaucoup plus fortes de sorte que les crues exceptionnelles peuvent être dues à ces petits bassins pentus (ex : LOUDA dont la surface légèrement supérieure à 200 km² peut être classé en catégorie R₂ et qui a subi en 1975 une crue d'un débit certainement supérieure à 500 m³/s. Un massif montagneux proche de l'exutoire d'où coulent quelques petits bras de très forte pente semble responsable de cette crue catastrophique).

1.4.2. - Précision des résultats :

Des remarques précédentes, il ressort que l'appréciation des paramètres est incertaine et ce, surtout en ce qui concerne la pente et la perméabilité. Si on note d'autre part comme l'ont déjà remarqué HLAVEK (16) et HENRY (9) que les erreurs relatives de chacun des termes intervenant dans le calcul des débits s'ajoutent, on constate que la méthode ne fournira pas à priori une grande précision sur la valeur des débits de crues décennales.

Par ailleurs, en supposant même que ces paramètres soient connus exactement, les abaques proposés par RODIER & AUVRAY ne présentent qu'un tracé "moyen" à travers un nuage de points expérimentaux et ainsi, chacune des courbes que nous avons tracées doit être considérée en fait comme le centre d'une plage de valeurs possibles.

Hormis le projeteur très averti, l'utilisateur pourra ainsi commettre facilement des erreurs de 50 à 100 %. Il importera donc, dans la mesure du possible de tenir compte de cette incertitude sur les résultats lors de l'établissement d'un projet.

.../...

2 - LA CRUE DU PROJET

Sauf dans certains cas particuliers, une durée de vie égale à dix ans est insuffisante. Faute de mesures suffisamment nombreuses, pour protéger un ouvrage contre une crue d'une durée de retour supérieure à dix ans, on convient généralement de majorer la crue décennale à l'aide d'un certain coefficient sans que nécessairement on ait une idée précise de la fréquence de la crue ainsi calculée.

- G. MATON (11) proposait de multiplier par 1,45 la valeur de la crue décennale pour évaluer la crue centenaire. Cette valeur est tenue maintenant pour trop faible.

- A l'heure actuelle, les ingénieurs suivent plus volontiers les recommandations de l'A.S.E.E.R. (Association Européenne d'Etudes d'Equipements Ruraux) (1) qui en 1963 préconisait de multiplier par deux la crue décennale pour obtenir la valeur d'une crue "exceptionnelle" qu'on peut appeler crue de projet (crue trentenaire ? centenaire ?).

- On se propose, quant à nous de définir le coefficient majorateur à adopter à partir d'une estimation de la crue centenaire d'après la méthode du gradex de GUILLOT & DUBAND (4) (5) (8).

- 2.1. - METHODE

L'hypothèse de base de la méthode est que le supplément de pluie par rapport à une certaine valeur dont la durée de retour est grande ruisselle intégralement. Si la loi de probabilité des pluies de durées t données à une décroissance exponentielle (gradient exponentiel = gradex), on montre alors que la loi de probabilité des débits moyens sur la durée t est "parallèle" à celle des pluies (exprimées dans la même unité) pour les faibles probabilités de dépassement. Le gradex des pluies est égal au gradex des débits. Une fois obtenu le débit moyen, on calcule le débit de pointe de l'hydrogramme en admettant que le rapport R de ces quantités est constant.

... / ...

Nous allons donc supposer ici :

a) - Que la méthode est applicable au delà de la crue décennale.

Cette hypothèse est bien entendu d'autant plus contestable que la perméabilité du bassin est plus forte : très vraisemblable pour un bassin dont le coefficient de ruissellement de la crue décennale est égal à 0,6, elle l'est beaucoup moins lorsque ce même coefficient est égal à 0,1. Nous nous limiterons donc aux perméabilités P_2 et P_3 de la classification précédente (Bassins "relativement imperméables" selon les auteurs de la méthode du gradex).

b) - Que la loi de probabilité des valeurs extrêmes des pluies a une décroissance exponentielle. Les études de BRUNET - MORET (2) (3) ainsi que quelques ajustements effectués en HAUTE VOLTA montrent que cette hypothèse est admissible.

c) - Que l'hydrogramme proposé par RODIER & AUVRAY est applicable au calcul de la crue centenaire (dans la réalité les phénomènes mis en jeu ne sont pas linéaires et les durées caractéristiques des hydrogrammes peuvent varier notablement en fonction de l'intensité de la pluie).

d) - Que le rapport R de la valeur du débit de pointe au débit moyen sur la durée t retenue est égal au coefficient de pointe K adopté par RODIER et AUVRAY pour les hydrogrammes. En conséquence, nous choisissons un intervalle de temps t (pour la pluie comme pour la crue moyenne) égal au temps de base de l'hydrogramme. Il y a donc ici une incohérence théorique entre les diverses durées utilisées, le calcul de la crue décennale étant effectué à partir de la pluie journalière et celui du "supplément de pluie" sur une durée différente. Cependant, sur le plan pratique, cette différence ne doit pas conduire à une erreur importante car les courbes intensité durée sont rapidement décroissantes (les averses ont en général une durée inférieure à cinq heures et la pluviométrie est ainsi sensiblement constante pour des variations importantes de la durée).

e) - Que, pour une fréquence donnée, les hauteurs d'eau précipitées sont liées à leur durée par une loi de MONTANA $h = hot^n$. D'après les études de BRUNET - MORET (3) et plus récemment celles de MOUNIS & MANSONGI (12) sur les averses exceptionnelles en Afrique Occidentale et Centrale, le coefficient n ne dépend pratiquement pas de la durée de retour et présente une variation spatiale faible (et sans tendance systématique). On retiendra donc une valeur unique pour les pluies décennales et centenaires : $n = 0.12$. On vérifie ici par la faible valeur de ce coefficient que les courbes précipitations - durées sont très plates.

.../...

f) - Que le coefficient d'abattement est le même pour les crues décennales et centenaires : (la formule proposée par VUILLAUME permettrait de déceler des variations de l'ordre de 10 % qui ne sont pas significatives). De toute façon le coefficient d'abattement est très certainement décroissant avec la pluviométrie et le coefficient retenu pour la crue centenaire va ainsi dans le sens de la sécurité.

Dans ces conditions :

Si Q_{100} est la crue centenaire cherchée

Q_{10} est la crue décennale

t_b est le temps de base du bassin exprimé en heures

P_{100} est la pluie centenaire de vingt quatre heures

P_{10} est la pluie décennale de vingt quatre heures

K, A et S les mêmes qu'auparavant

K_r le coefficient de ruissellement de la crue décennale

$$Q_{100} = Q_{10} + \frac{K.A.S}{t_b} (P_{100} - P_{10}) \left(\frac{t_b}{24}\right)^n$$

$$Q_{100} = P_{10} \left[1 + \frac{(P_{100} - P_{10})}{P_{10}} \frac{\left(\frac{t_b}{24}\right)^n}{K_r} \right]$$

2.2... - RESULTATS

2.2.1. - Le Coefficient majorateur C :

La crue centenaire est donc déduite de la crue décennale par l'intermédiaire d'un coefficient majorateur

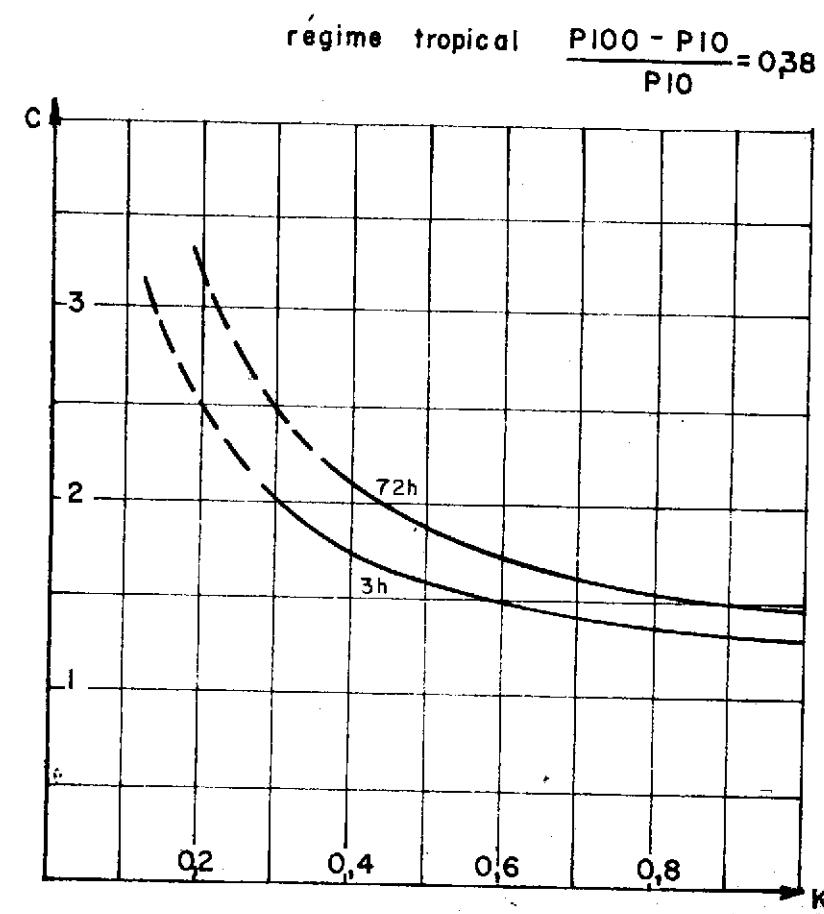
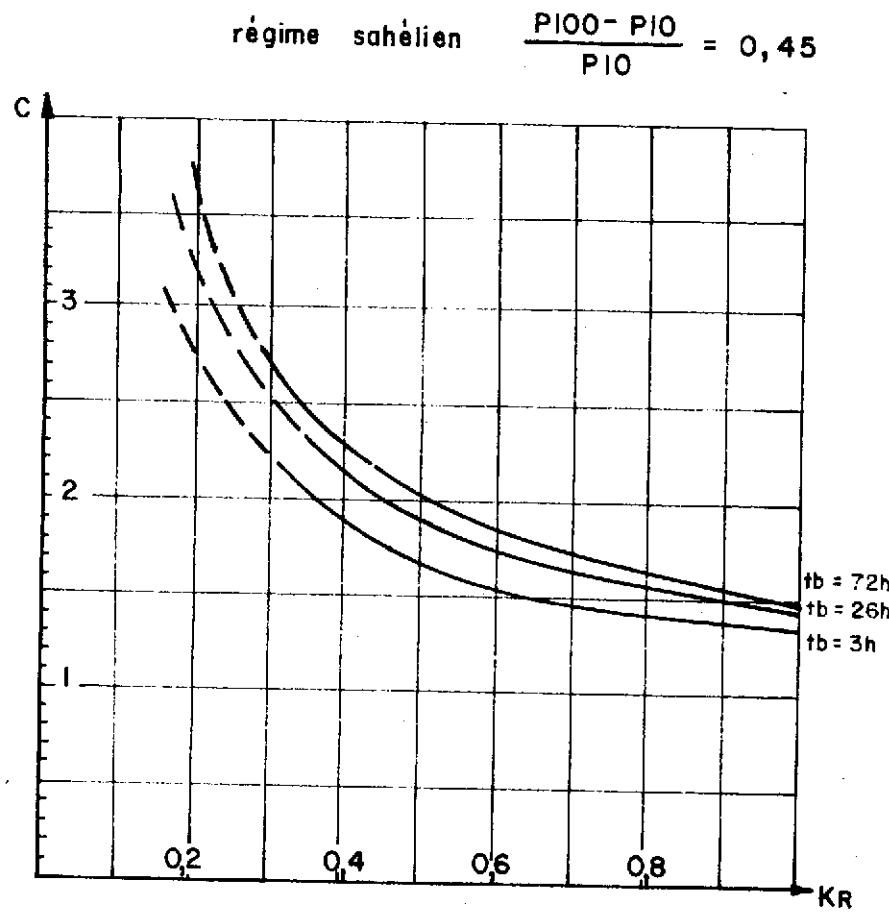
$$C = 1 + \left(\frac{P_{100} - P_{10}}{P_{10}} \right) \frac{\left(\frac{t_b}{24}\right)^n}{K_r}$$

L'étude du rapport $(P_{100} - P_{10}) / P_{10}$ en Afrique Occidentale (annexe) permet de constater que ce rapport est sensiblement constant et de retenir pour la suite de cette note les valeurs 0,45 en régime sahélien et 0,38 en régime tropical. Sur la figure 4 on a représenté la valeur du coefficient majorateur C en fonction du coefficient K_r pour diverses valeurs du temps de base t_b . La signification de ce coefficient est probablement douteuse pour des valeurs de K_r inférieures à 0,3.

.../...

Fig 4
Rapport entre la crue centenaire et la crue décennale
en fonction du coefficient de ruissellement pour la crue décennale
et pour divers temps de base de l'hydrogramme

$$C = 1 + \frac{P_{100} - P_{10}}{P_{10}} \cdot \frac{(tb/24)^{0,12}}{KR}$$



On constate que le coefficient majorateur proposé par MATON (1,45) représente un ordre de grandeur valable pour des bassins imperméables ($K_r > 0,6$). Pour les petits bassins la valeur proposée par l'ASEER (2.00) surestime les crues centenaires et particulièrement en régime tropical.

On vérifie d'autre part que les variations en fonction de t_b ne sont pas très importantes (exposant $n = 0,12$ faible).

Enfin, on remarque que la distinction entre régime tropical et sahélien conduit à des différences peu importantes. Nous conserverons néanmoins cette distinction puisqu'elle existe déjà dans le calcul du débit décennal. Cette remarque nous permet cependant de constater que le rapport $(P_{100} - P_{10})/P_{10}$ peut présenter des variations assez importantes sans que la valeur de C soit beaucoup modifiée et que les résultats obtenus sont donc également acceptables dans les zones de la côte occidentale pour lesquelles le rapport $(P_{100} - P_{10})/P_{10}$ est plus élevé (cf annexe).

Remarque :

En prenant une grande liberté par rapport à la méthode du gradex, nous avons calculé le coefficient suivant :

$$C' = 1 + \frac{P_{100} - P_{10}}{P_{10}} \left(\frac{t_b}{24} \right)^n \frac{1 + K_R}{2K_R}$$

qui signifierait en gros que le supplément de pluie $P_{100} - P_{10}$ ruisseille avec un coefficient $(1 + K_R)/2$ intermédiaire entre K_R et l'unité.

En régime sahélien on obtient pour le rapport C'/C

K_R	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	1,0
C'/C ($t_b = 3$ h)	0,65	0,75	0,81	0,90	0,95	1,00
C'/C ($t_b = 24$ h)	0,62	0,71	0,78	0,87	0,94	1,00

Pour K_R supérieur à 0,3, les coefficients C et C' diffèrent de moins de 25 %. On peut donc raisonnablement penser que le coefficient C défini

.../...

dans ce paragraphe donne un ordre de grandeur valable du rapport Q_{100}/Q_{10} pour K_R supérieur à 0,3 et que les approximations dues à la méthode du gradex sont assez précises en regard de celles rencontrées lors du calcul du débit décennal.

2.2.2. - Les débits centenaires :

A l'aide de la méthode du gradex et en utilisant les valeurs moyennes annoncées plus haut pour n et $\frac{P_{100}}{P_{10}}$, nous avons calculé la crue centenaire correspondant à un lieu où la pluie décennale est de 100 mm, pour les terrains de perméabilité faible P_2 et P_3 ainsi que P_4 pour les pentes fortes (figures 5 et 6). On a représenté en pointillé les courbes telles que le coefficient de ruissellement pour la crue décennale est inférieure à 0,3. Comme précédemment on obtient la crue centenaire en multipliant le débit lu sur ces abaques par le rapport $\frac{P_{10} \text{ mm}}{100}$.

On peut noter la nette diminution de l'effet des perméabilités sur le débit de la crue centenaire. Pour les régimes tropicaux en particulier, la perméabilité semble ne plus jouer aucun rôle.

Il est probablement exagéré de ne plus accorder aucun effet aux perméabilités des sols sur les crues de faible durée de retour ; toutefois il semble utile de noter la diminution de leur influence. Ainsi des petits bassins du nord de la Haute Volta, aux sols sableux mais dont certaines crues sont surprenantes (ex. : SALMOSSI, petit barrage détruit près de Markoye).

3 - LAMINAGE DES CRUES

Dimensionner un ouvrage évacuateur de telle manière qu'il puisse laisser passer la pointe de l'hydrogramme de la crue à l'entrée du réservoir de stockage correspond à un surdimensionnement.

Le réservoir joue un rôle de "tampon" de sorte que le maximum du débit Q_{eM} à l'évacuateur est inférieur au maximum de débit Q_{CM} de l'hydrogramme. On cherche ici à estimer de manière simple le rapport $\frac{Q_{eM}}{Q_{CM}}$ entre ces deux débits pour pouvoir dimensionner l'ouvrage évacuateur.

Les paramètres intervenant pour fixer la valeur de ce rapport sont :

- Des paramètres géométriques définissant la réserve et l'évacuateur :
 - . S : la surface du plan d'eau lorsque les eaux arrivent au niveau

.../...

Régime sahélien

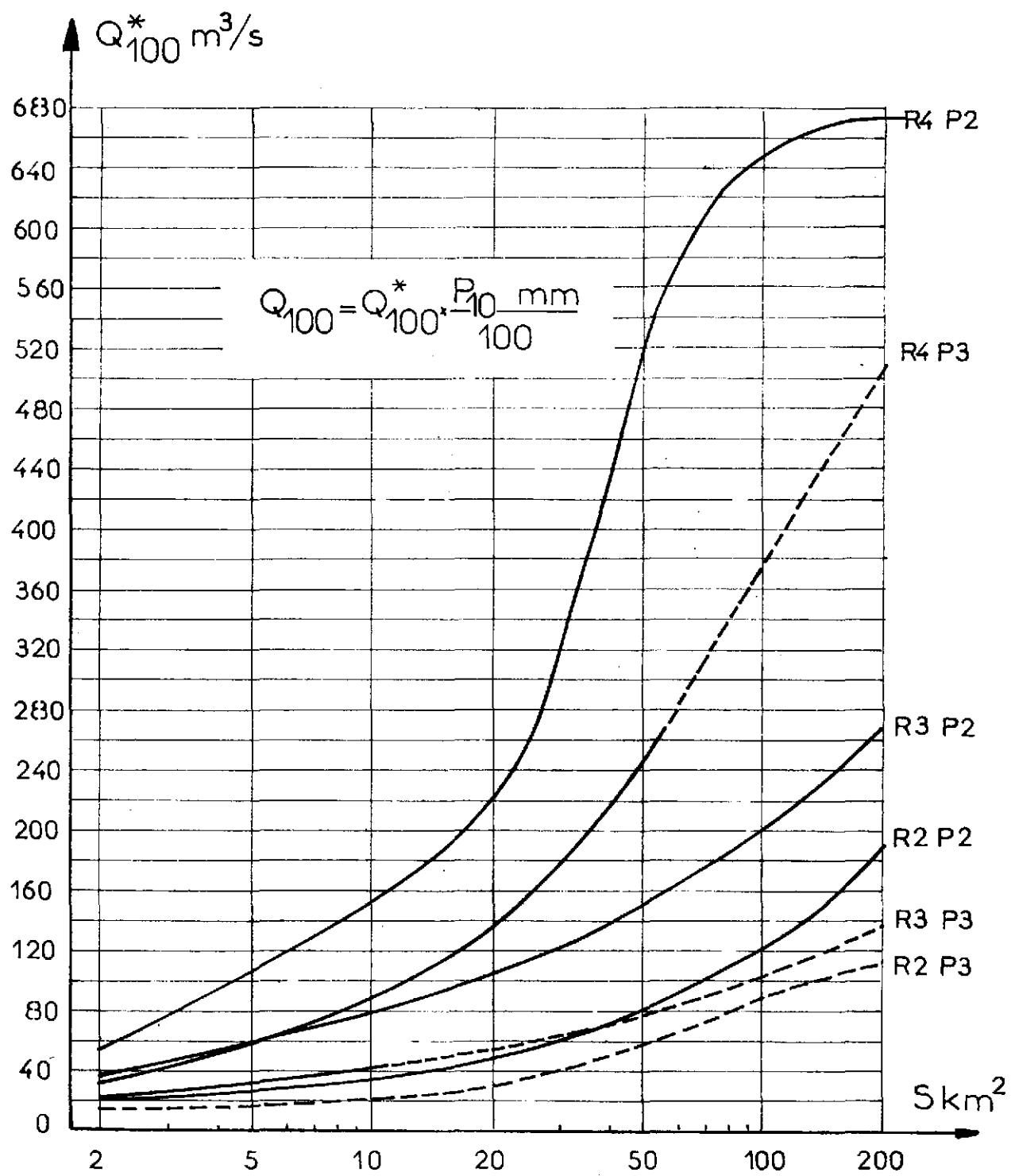


Fig 5 Débit centenaire pour une pluie décennale de 100mm en régime sahélien.

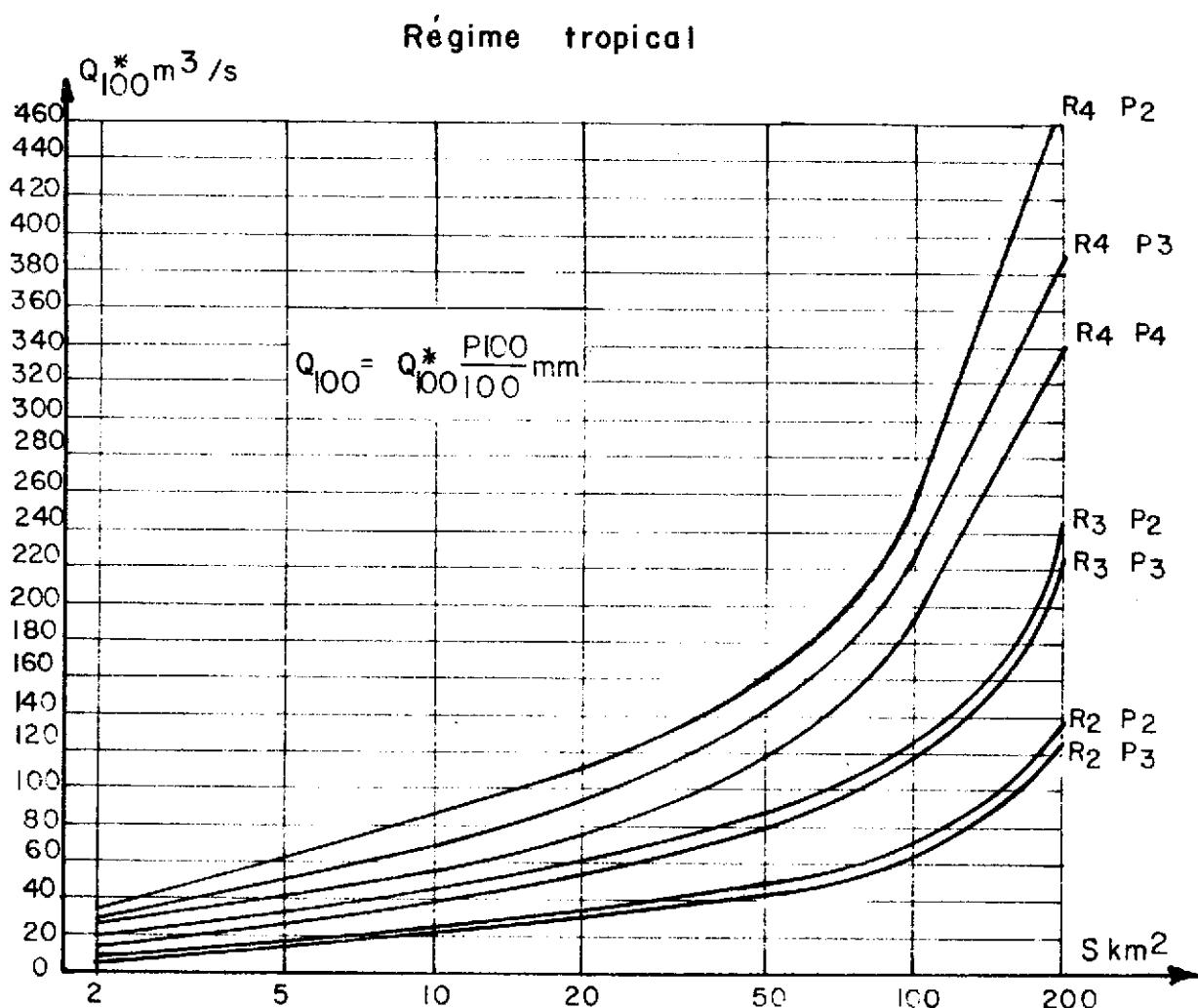


Fig:6 Débit centenaire pour une pluie décennale de 100mm en régime tropical.

- de l'évacuateur ;
- L : la largeur de l'évacuateur ;
 - La forme de l'évacuateur qui détermine son coefficient de débit "m" ; la loi des débits sur l'évacuateur étant supposée de la forme $Q = m L h \sqrt{2gh}$ (h : hauteur d'eau au-dessus du seuil).
- Des paramètres définissant la forme de l'hydrogramme de la crue $Q_c(t)$. Théoriquement on ne peut à l'aide d'un nombre fini de paramètres, définir un hydrogramme à moins de le schématiser, ce que nous faisons.

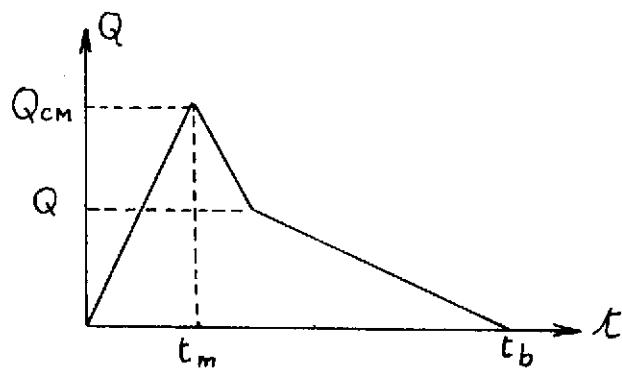
3.1. - SCHEMATISATION DES HYDROGRAMMES

Il importe de connaître la forme des hydrogrammes des crues exceptionnelles contre lesquelles on a choisi de protéger les ouvrages.

Les hydrogrammes dont on connaît les temps de base et temps de montée grâce à la note de MM. RODIER & AUVRAY (15) sont intitulés "hydrogrammes unitaires". Pourtant la note en question effectue le calcul des débits des crues exceptionnelles en adoptant ces temps comme caractéristiques des hydrogrammes de crues exceptionnelles. Une étude détaillée des hydrogrammes adoptés par les auteurs à partir des données présentées par DUBREUIL montre que ceux-ci peuvent en fait être considérés effectivement comme typiques des crues exceptionnelles et non unitaires.

Ainsi, nous construisons des hydrogrammes schématiques en trois tronçons linéaires respectant les données relatives à ces crues et déjà rencontrées auparavant :

- Q_{CM} : débit maximum de pointe calculé précédemment
- t_b : temps de base de l'hydrogramme.
- t_m : temps de montée des eaux (voir figure 7 et 8)
- K : rapport entre débit de pointe et débit moyen de la crue.



.../...

La diminution du débit est représentée par une ligne brisée dont la première partie est constituée par le symétrique de la montée et la fin par une droite rejoignant la durée t_b . Le changement de pente s'effectue à un débit Q dont la valeur est fixée par une relation exprimant que le débit maximum et le débit moyen de la crue sont dans un rapport K .

$$\frac{Q}{Q_{CM}} = \frac{2}{K} \quad \frac{t_b - K t_m}{t_b - 2 t_m}$$

On montre en réalité que, dans les cas les plus courants, la deuxième partie de la descente ne joue aucun rôle en ce qui concerne le rapport Q_{eM}/Q_{CM} , c'est ce qui nous a permis de ramener l'hydrogramme à une montée linéaire de durée t_m et une descente symétrique. Les paramètres définissant l'hydrogramme sont alors : Q_{CM} et t_m .

La crue exceptionnelle dont le débit maximum est égal à Q_{CM} est théoriquement provoquée par une pluie uniforme dont la durée est égale au temps de montée t_m . On sait que les pluies de même fréquence mais dont les durées sont supérieures à t_m ont une intensité moindre et provoquent des débits maxima de crue inférieurs à Q_{CM} . Toutefois l'effet du laminage sur celles-ci est moins fort et il importe de rechercher la valeur Q_{eM} la plus importante après laminage, aussi avons-nous considéré également des hydrogrammes schématisés par une forme trapézoïdale :

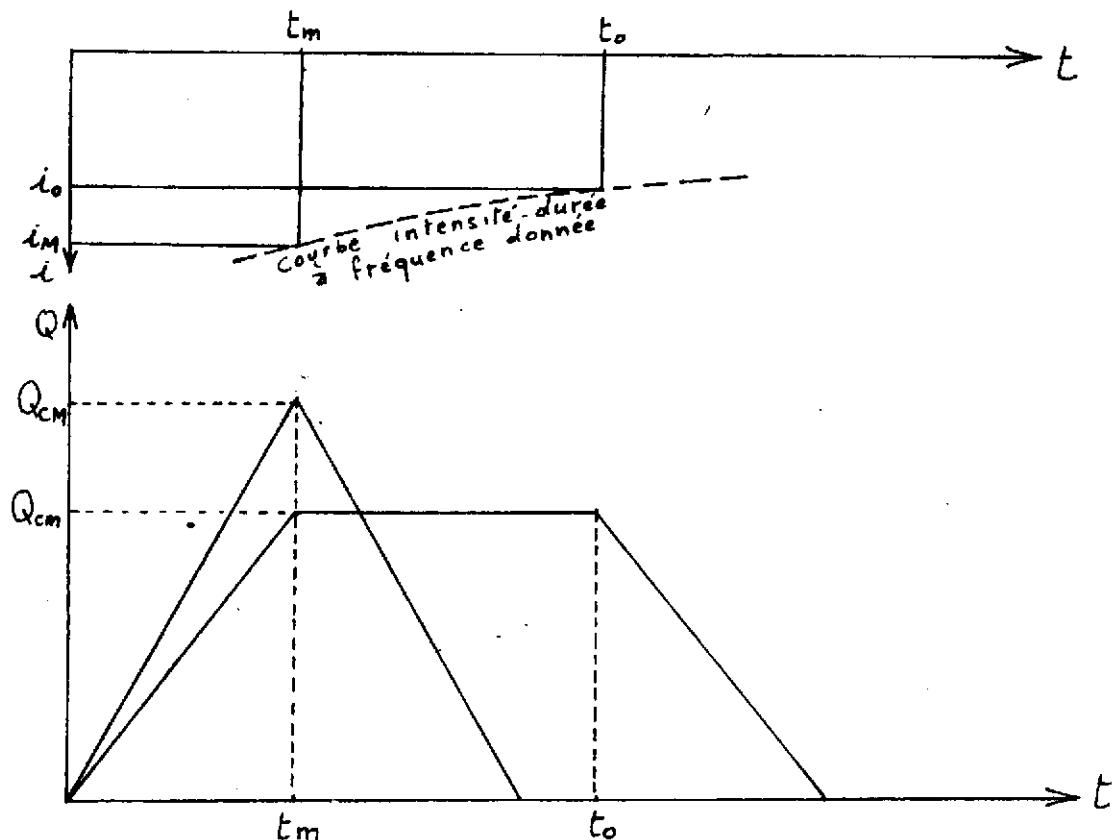
- Montée des eaux de durée t_m
- Valeur maximum du débit Q_{CM} depuis le temps t_m jusqu'au temps t_o
- descente des eaux symétrique de la montée.

Cet hydrogramme représente théoriquement une crue provoquée par une pluie uniforme dont la durée est t_o .

Le débit Q_{cm} est lié au débit maximum Q_{CM} de la crue en pointe et aux temps t_m et t_o si l'on admet que la loi de Montana s'applique aux pluies considérées et si d'autre part on considère pour simplifier, que les débits maxima Q_{CM} et Q_{cm} sont proportionnels aux intensités des pluies qui les provoquent :

$$Q_{cm} \cdot t_o^{1-n} = Q_{CM} \cdot t_m^{1-n}$$

.../...



3.2. - CALCUL DE L'EFFET DU LAMINAGE

Soient donc :

m le coefficient de débit de l'évacuateur

L la largeur de l'évacuateur

h la hauteur du plan d'eau au-dessus du seuil du déversoir

S la surface du plan d'eau lorsque les eaux arrivent au niveau de l'évacuateur

g l'accélérateur de la pesanteur.

Le débit instantané au-dessus de l'évacuateur est donné par la relation :

$$(1) \quad Q_e = m L \sqrt{2g} h^{3/2}$$

La différence entre les débits d'entrée Q_e et de sortie Q_e provoque une variation dh du niveau du plan d'eau pendant l'intervalle de temps dt ; S étant supposée constante lorsque h augmente :

$$(2) \quad S dh = (Q_c - Q_e) dt$$

.../...

après le changement de variables suivant :

$$\begin{aligned} Q_e &= \sqrt{\frac{g}{L^5}} Q \\ Q_c &= \sqrt{\frac{g}{L^5}} Q' \\ t &= \frac{S}{(2m^2)^{1/3} \sqrt{g L^3}} T \end{aligned}$$

Les équations (1) et (2) donnent :

$$(3) - \boxed{\frac{d(Q^{2/3})}{dt} + Q = Q'}$$

Cette équation (3) a été intégrée numériquement pour les divers hydrogrammes décrits précédemment sur lesquels on a préalablement normalisé les débits de crue grâce à la forme particulière de l'équation (3). (cf référence n°7).

3.3. - RESULTATS

On a pu mettre en évidence le rôle d'un paramètre dimensionnel unique que nous appelons X_0 , pour déterminer l'effet d'un laminage sur les crues dont les hydrogrammes sont triangulaires ou trapézoïdaux.

$$\boxed{X_0 = \frac{m^2 \cdot g \cdot L^2 \cdot Q_{CM} \cdot t_m^3}{S^3}}$$

L'effet de laminage est évalué sous la forme d'un coefficient :

Q_{eM}/Q_{CM} (débit maximum à 1'évacuateur / débit maximum de la crue triangulaire).

Pour plusieurs valeurs, choisies à priori, du coefficient n de la loi de Montana, nous avons calculé l'effet du laminage sur la crue triangulaire mais aussi sur les crues trapézoïdales qui s'en déduisent :

$Q_{eM} = Q_{CM} \left(\frac{t_m}{t_0} \right)^{1-n}$; dans chaque cas, il existe un hydrogramme le plus défavorable, c'est-à-dire tel que le débit à 1 évacuateur à une valeur maximale, c'est cette valeur que nous appelons Q_{eM} .

La figure 9 permet d'obtenir directement Q_{eM}/Q_{CM} en fonction de $\log_{10} X_0$ pour une valeur donnée du coefficient n de Montana. Le tracé correspondant à $n = 0,12$ est à adopter en Afrique occidentale compte tenu des résultats déjà énoncés de MOUNIS et MANSONGI (12).

.../...

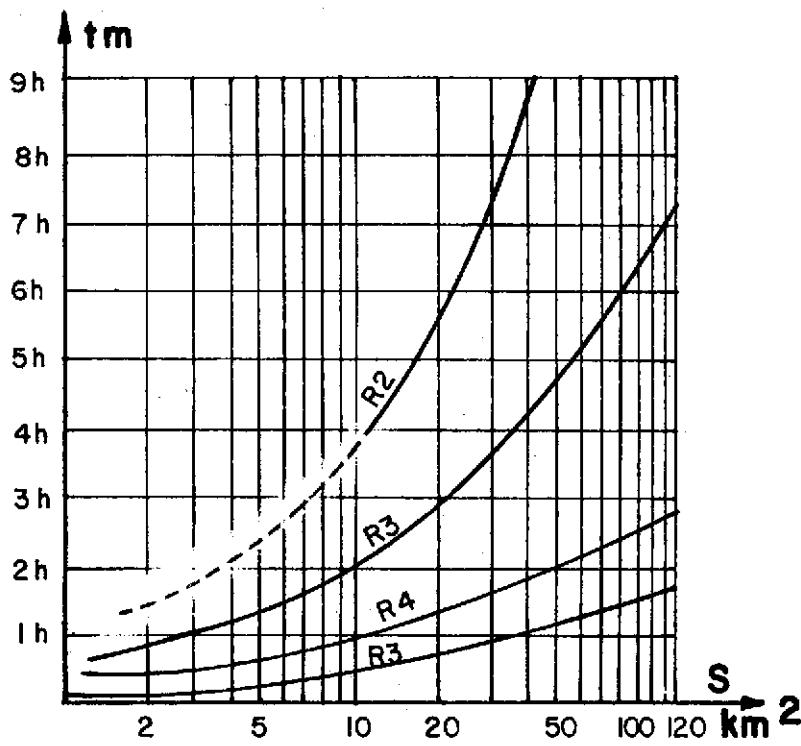


Fig:7 Temps de montée – Régime sahélien

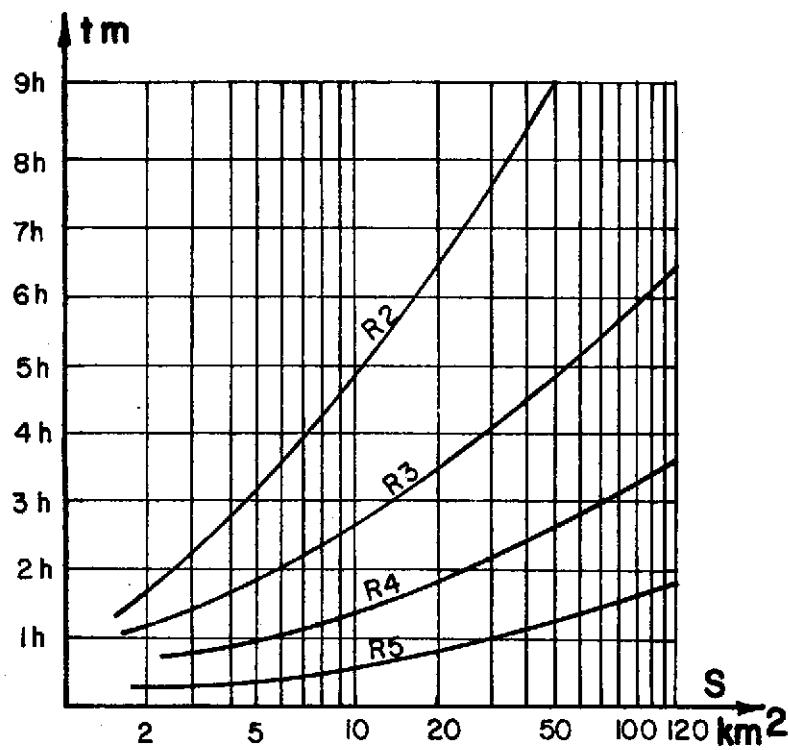


Fig:8 Temps de montée - Régime tropical

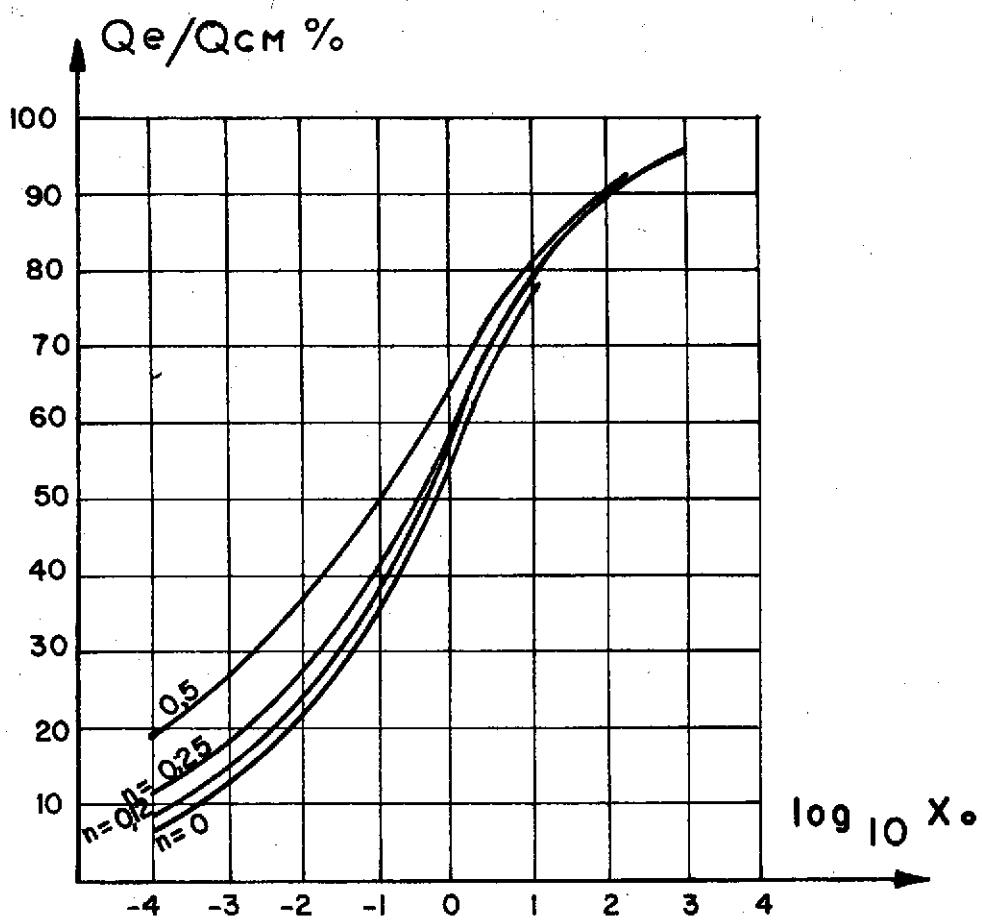


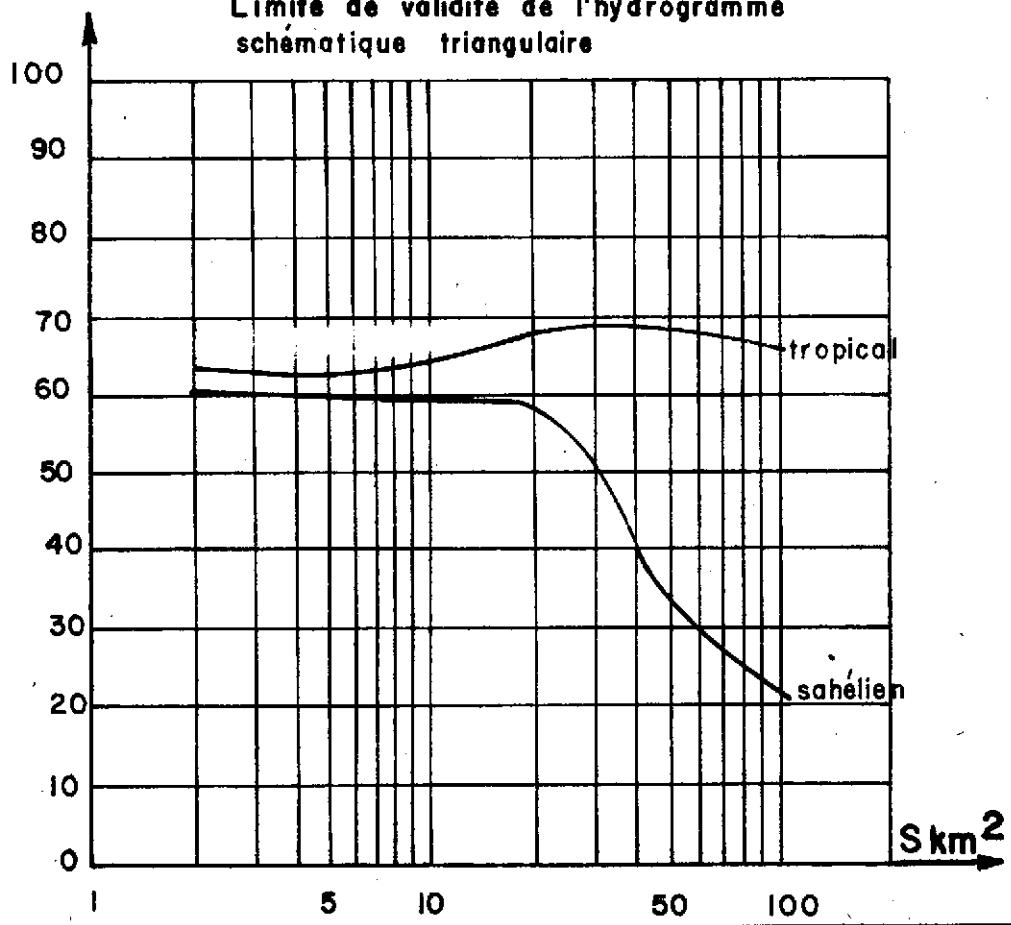
FIG:9

Effet du laminage (exprimé en pourcentage par rapport à la crue la plus forte) pour diverses valeurs du coefficient n de Montana .

Q / Q_{CM} %

FIG:10

Limites de validité de l'hydrogramme schématique triangulaire



3.4. - REMARQUES

Les schémas utilisés ont une validité limitée dans le cas des très fort laminages. En effet, lorsque le débit trouvé Q_{eM} est inférieur à la valeur Q définie ayant, où commence la décroissance moins rapide du débit de la crue ($Q = \frac{2}{K} \cdot \frac{t_b - K t_m}{t_b - 2t_m}$), on surestime l'effet du laminage.

On donne (figure 10) les limites de validités de notre étude schématique. Lorsque Q_{eM}/Q_{CM} trouvé est inférieur à la valeur Q/Q_{CM} de la figure 10, il y a lieu d'être prudent quant à la valeur Q_{eM} trouvée. C'est en fait un cas relativement peu fréquent.

- Le paramètre X_0 montre bien l'importance de chaque paramètre quant à leur efficacité sur le laminage. Ainsi la surface du bassin S et le temps de montée t_m , tous deux à la puissance 3 sont les paramètres essentiels. Les bassins de pentes faibles, ayant les temps de montée les plus longs subissent donc les laminages les plus faibles ; ce sont par ailleurs ceux dont les débits de crue sont les plus faibles. Le laminage des crues a donc un effet légèrement égalisateur sur les débits à prévoir pour les évacuateurs.

4 - DEUX EXEMPLES PRATIQUES DE DIMENSIONNEMENT

4.1. - SUPPOSONS UN BARRAGE SITUÉ PRES DE KOUDOUGOU EN HAUTE-VOLTA (NANORO) -

- La surface du bassin versant est égale à 38 km²
- les pentes sont faibles (type R2)
- les perméabilités sont faibles (évaluées en catégorie P2)
- la pluviométrie annuelle est d'environ 800 mm
- la pluie décennale de vingt quatre heures est égale à 110 mm
- la crête du barrage est située à la côte + 4,25 m, le déversoir doit être situé à la côte + 3 m telle que la surface du plan d'eau au niveau de ce déversoir est égale à 62 hectares.

Quelle doit être la largeur du déversoir pour qu'il y ait une revanche de 0,5 m, même en cas de crue centenaire.

a) - Crue décennale :

.../...

On considère que le régime climatique est du type sahélien (plus sévère).

R₂ P₂ à 38 km² $Q_{10}^* = 30 \text{ m}^3/\text{s}$
(figure 1).

$$Q_{10} = 30 \times \frac{110}{100} = 33 \text{ m}^3/\text{s.}$$

b) - Crue centenaire : la figure 5 permet de lire :

$$R_2 P_2 \text{ à } 38 \text{ km}^2 \quad Q_{100}^* = 70 \text{ m}^3/\text{s.}$$

$$Q_{100} = 70 \times \frac{110}{100} = 77 \text{ m}^3/\text{s} = Q_{CM}$$

c) - Effet du laminage :

Le temps de montée des eaux est d'environ 8 h 30 (figure 7)

Supposons à priori la largeur du déversoir égale à 40 m.

$$X_0 = \frac{m^2 \times g \times L^2 \times Q_{CM} \times t_m^3}{S^3} = \frac{(0,4)^2 \times 10 \times (40)^2 \times 77 \times (8,5 \times 3600)^3}{(62 \cdot 10^4)^3}$$

$$\log X_0 = 1,37$$

$$Q_e/Q_{CM} = 0,83 \quad (\text{figure 9})$$

$$Q_e = 0,85 \times 77 = 64 \text{ m}^3/\text{s}$$

Pour évacuer un tel débit avec une lame d'eau de 0,75 m il faut un déversoir mesurant 55 m de long (Si $m = 0,4$).

Il faut reprendre l'étude pour $L = 55 \text{ m.}$

L	log X ₀	Q _e /Q _{CM}	Q _e	L'
40	1,37	0,83	64	55
55	1,65	0,87	67	57
57	1,68	0,87	67	57

Un déversoir de 57 m est nécessaire pour évacuer la crue centenaire dans les conditions requises. On vérifie sur la figure 10 que l'effet de

laminage obtenu (87 %) est bien situé dans le domaine de validité de l'hydrogramme schématique triangulaire :

Pour R2 P2 sahélien à 38km² ce schéma est valable tant que

$$Q_e/Q_{CM} \geq 40 \%$$

4.2. - SUPPOSONS QUE L'ON VÉUILLE CONSTRUIRE UN BARRAGE SUR LE BASSIN VERSANT AINSI DEFINI

- Sa surface égale à 7 km²
- Ses pentes sont du type R3
- Ses perméabilités sont évaluées en catégorie P3
- La pluie décennale du lieu est d'environ 115 mm. Le régime est tropical.

Par souci d'économie on veut limiter à 30 m la largeur du déversoir de ce barrage. Sachant que la crête de la digue est à la côte + 5 m. On cherche quelle cote donner au déversoir pour que la revanche soit toujours de 0,5 m, sachant qu'à la côte + 3 m le plan d'eau a une surface de 15 hectares et qu'à la côte + 4 m, il a une surface de 25 hectares.

a) - Crue centenaire :

$$\text{La figure 6 permet de lire } Q_{100}^* = 35 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{100} = 35 \times \frac{115}{100} = 40 \text{ m}^3/\text{s} = Q_{CM}$$

b) - Etude du laminage :

Le temps de montée des eaux est de 2 h 15' (figure 8). S'il n'y avait aucun effet de laminage pour évacuer 40 m³/s sur un déversoir de 30 m il faudrait une hauteur $h = 0,82$ m. La cote du déversoir serait d'environ + 5,00 - 0,8 - 0,5 = + 3,7 m à cette cote la surface du plan d'eau est de 22 hectares (interpolation linéaire).

L'effet de laminage est alors calculable à l'aide de la figure 9

Cote m	S hect.	log Xo	Q_e/Q_{CM}	Q_e	h	Cote
3,7	22	0,46	0,65	26	0,62	3,9 m
3,9	24	0,34	0,63	25	0,60	3,9 m

.../...

Le déversoir est à caler à la cote 3,9 m.

On vérifie que l'effet de laminage obtenu (63 %) est compatible avec la limite de validité du schéma triangulaire qui est précisément atteinte lorsque $Q_e/Q_{CM} = 63 \%$ (figure 10).

- ==000== -

A N N E X E

Etude du Rapport $\frac{P_{100} - P_{10}}{P_{10}}$

D'après BRUNET - MORET (*rapport (2) - rapport de synthèse 1968*), la pluviométrie journalière en Afrique occidentale est assez bien représentée par une distribution Γ incomplète :

$$\begin{aligned}\text{Prob (Pluie} \leq P\text{)} &= F_0 + \left(\frac{1 - F_0}{P(\gamma)} \right) \times \int_0^u v^{\gamma-1} e^{-v} dv \\ &= F(P) = F_0 + (1 - F_0) G(P)\end{aligned}$$

$u \equiv \frac{P-P_0}{s}$ variable réduite de la loi Γ (P_0 paramètre de position pris égal à 0 mm, s paramètre d'échelle).

F_0 Paramètre de tronquage. Théoriquement ce paramètre mesure la probabilité d'avoir une pluie journalière inférieure à un seuil donné (en adoptant la valeur de la quantité minimale mesurée en pluviométrie 0,1 mm, on mesure le nombre de jours secs). En pratique le calcul par la méthode des moments conduit à des valeurs de F_0 légèrement inférieures aux valeurs observées.

γ Paramètre de forme. Ce paramètre a assez peu d'influence sur les valeurs de P_{10} et P_{100} . Par ailleurs il est sensiblement constant et de l'ordre de 0,70 à l'est du méridien 14° W et varie de 0,40 à 0,70 à l'ouest de ce méridien.

La pluie de récurrence n années à une fréquence journalière de dépassement 1/365 (*) et donc : $F(P_{100}) = 1 - 1/36500$, $F(P_{10}) = 1 - 1/3650$.

La relation $G(P) = \frac{F(P) - F_0}{1 - F_0}$ permet de calculer pour chaque valeur de F_0 les valeurs $G(P_{100})$ et $G(P_{10})$ dont on déduit (tables de la fonction Γ) les valeurs correspondantes de la variable réduite u_{100} et u_{10} soit :

..../...

(*) On pourrait adopter une définition différente pour la pluie de récurrence n années, celle du maximum annuel de probabilité de dépassement 1/n. Cependant ces deux définitions conduisent à des valeurs identiques de la pluie dès que n est supérieur à 5 ans.

	F_o	0,50	0,70	0,90	0,95
	$G(P_{10})$	0.999452	0.999087	0.99726	0.99452
	$G(P_{100})$	0.9999452	0.9999087	0.999726	0.999452
$\gamma = 0,4$	u_{10}	5.58	5.11	4.12	3.50
	u_{100}	7.71	7.24	6.22	5.58
	$\frac{P_{100} - P_{10}}{P_{10}} = \frac{u_{100} - u_{10}}{u_{10}}$	0.38	0.42	0.51	0.59
$\gamma = 0,7$	u_{10}	6.64	6.15	5.09	4.43
	u_{100}	8.86	8.37	7.30	6.64
	$\frac{P_{100} - P_{10}}{P_{10}}$	0.34	0.36	0.43	0.50

Par ailleurs, afin de situer géographiquement les rapports ainsi calculés, on peut rappeler le résultat (grossier) déduit du rapport (2) liant la pluviométrie moyenne annuelle \bar{P} à F_o .

\bar{P} (mm)	100	500	1.000	1.500
F_o	0.96	0.88	0.79	0.69

De cet ensemble de résultats, on peut déduire que le rapport

$\frac{P_{100} - P_{10}}{P_{10}}$ varie à l'est du méridien 14° W entre 0,40 et 0,50 en zone sahélienne et subdésertique, et entre 0,35 et 0,40 en zone tropicale. A l'ouest de ce méridien, il augmente jusqu'à atteindre les fourchettes respectives de 0,46 - 0,60 et 0,41 - 0,46.

Nous retenons dans cette note les deux valeurs 0,45 et 0,38 qui peuvent être considérées comme caractéristiques moyennes des deux régimes pluviométriques. A l'ouest du méridien 14° W il conviendrait de majorer ces coefficients mais l'incidence sur les résultats serait mineure et sans grande mesure avec les approximations de cette note.

B I B L I O G R A P H I E

- (1) A S E E R Aménagements d'hydraulique agricole - Construction de barrages (Synthèse, présentations, monographies) Avril 1963.
- (2) BRUNET-MORET Etude Générale des averses exceptionnelles en Afrique Occidentale (8 rapports + rapport de synthèse). ORSTOM - CIEH 1963 - 1968.
- (3) BRUNET-MORET Etablissement d'un fichier pluviométrique opérationnel et étude des averses exceptionnelles - Application à la Côte d'Ivoire. ORSTOM - CIEH Octobre 1976.
- (4) COLIN, MEUNIER, PUECH Problèmes hydrologiques relatifs à l'étude des crues - CTGREF - Mai 1972.
- (5) C.T.G.R.E.F. Application de la méthode du gradex à l'estimation des crues de faible fréquence. Division hydrologie - Juillet 1972.
- (6) DUBREUIL Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux. Années 1951 - 1969. ORSTOM 1972.
- (7) GRESILLON, HERTER Etude schématique de laminage des crues sur les petites retenues d'Afrique de l'Ouest. Publication de l'Ecole Inter-Etats d'Ingénieurs de l'Equipement Rural - Juillet 1976.
- (8) GUILLOT, DUBAND La méthode du gradex pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies. SHF. Xe journées de l'hydraulique 1968.
- (9) HENRY République de Haute-Volta - Etude des ressources en eau de surface. PNUD. Projet UPV/72/039 Annexe II - Mai 1975.
- (10) KLEIN Etude hydrologique des bassins représentatifs dans le S.E. de la Haute-Volta 1963 - 65. ORSTOM - Service hydrologique 1967.
- (11) MATON Introduction à un important programme de construction de petits barrages en terre en Haute Volta 1960.
- (12) MOUNIS, MANSONGI Note provisoire sur les pluies exceptionnelles de faible durée en Afrique occidentale et centrale. C.I.E.H. 1974.
- (13) ORSTOM Etude hydrologique de bassins versants expérimentaux dans l'Est-Volta. Bassins de Boulsa - Campagne 1960. Rapport définitif. ORSTOM. Service hydrologique Août 1961.
- (14) ORSTOM Etude hydrologique de bassins versants dans la région de Ouagadougou - Campagne 1961. ORSTOM - Service hydrologique - Septembre 1963.

.../...

- (15) RODIER, AUVRAY Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique occidentale.
ORSTOM - CIEH Juillet 1965.
- (16) CORDOILLET, POST Etude critique des petits barrages en terre. Rapport au gouvernement de la Haute-Volta.
HLAVEK
F.A.O. Rome 1967.
- (17) VUILLAUME L'abattement des précipitations journalières en Afrique Intertropicale. Variabilité et précision du calcul. Cah. ORSTOM Service hydrologique - Vol XI n°/ 3 1974.

- ==00o== -