

ORSTOM

**Institut Français de Recherche Scientifique
pour le Développement en Coopération**

**ESTIMATION DES CARACTERISTIQUES
DE LA CRUE DECENNALE POUR LES
PETITS BASSINS VERSANTS DU SAHEL
COUVRANT DE 1 A 10 KM²**

**J. RODIER
P. RIBSTEIN**

**Département des Eaux Continentales
Unité de Recherche 202**

**Laboratoire d'Hydrologie
de Montpellier**

Février 1988

SOMMAIRE

INTRODUCTION

1. LA NOTION DE CRUE DECENNALE
2. PROBLEME DE L'ESTIMATION DE LA CRUE DECENNALE
3. DETERMINATION DE LA CRUE DECENNALE PAR LE MODELE GLOBAL
 - 3.1. DEFINITION DU MODELE GLOBAL
 - 3.2. APPLICATION DU MODELE GLOBAL A DES CRUES OBSERVEES SUR UN BASSIN REPRESENTATIF
 - 3.2.1. FONCTION DE PRODUCTION
 - 3.2.1.1. Détermination de la pluie décennale à un poste de référence
 - 3.2.1.2. Passage de la pluie ponctuelle à la lame moyenne décennale précipitée sur le bassin
 - 3.2.1.3. Transformation de la lame précipitée en lame ruisselée décennale
 - 3.2.2. FONCTION DE TRANSFERT
4. TRANSPOSITION - APPLICATION A DES BASSINS NON JAUGES
 - 4.1. CONSIDERATIONS GENERALES
 - 4.2. METHODOLOGIES DE TRANSPOSITION
 - 4.3. POSSIBILITES D'AMELIORATION
5. MESURES POUR L'AMELIORATION DE L'ESTIMATION DE LA CRUE DECENNALE
 - 5.1. PROGRAMME FORCRUSA
 - 5.2. REPERTOIRE
 - 5.3. QUESTIONNAIRE
6. REVISION DES COEFFICIENTS DE RUISELLEMENT DECENNAUX

7. FORME DE L'HYDROGRAMME, TEMPS DE MONTEE, TEMPS DE BASE, COEFFICIENT DE POINTE

7.1. FACTEURS INFLUENCANT LA FORME DE L'HYDROGRAMME

7.2. HYDROGRAMMES UNITAIRES INSTANTANES

7.3. DONNEES PLUVIOGRAPHIQUES DE BASE

7.4. HAUTEUR DU CORPS, DUREE DU CORPS, HYETOGRAMME

7.4.1. HAUTEUR DU CORPS

7.4.2. DUREE DU CORPS

7.4.3. FORME DU HYETOGRAMME

7.5. ETUDE DES CARACTERISTIQUES DE FORME DE L'HYDROGRAMME

7.5.1. PRINCIPES

7.5.2. ETUDE PRELIMINAIRE

7.5.3. METHODOLOGIE DE CALCUL

7.5.4. CALCUL DU DEBIT DECENNAL POUR UN BASSIN

8. RESULTATS

8.1. RESULTATS BRUTS

8.2. TEMPS DE MONTEE DE L'HYDROGRAMME COMPOSE

8.3. TEMPS DE BASE DE L'HYDROGRAMME COMPOSE

8.4. COEFFICIENTS DE POINTE

8.5. DEBITS DE LA CRUE DECENNALE

8.5.1. CRUES PROVOQUEES PAR DES TRANCHES D'AVERSE DE 15 ET 30 MINUTES

8.5.2. CAS GENERAL

8.5.3. DEBITS DE POINTE DECENNAUX DES BASSINS REPRESENTATIFS

8.5.3.1. Remarques préliminaires

8.5.3.2. Détermination des débits de pointe décennaux : Méthodologie du calcul par hydrogramme composé

8.5.4. DETERMINATION DES DEBITS DE POINTE DECENNAUX : METHODOLOGIE SIMPLIFIEE

8.6. COMMENTAIRES SUR LES RESULTATS

8.6.1. REMARQUES PRELIMINAIRES

8.6.2. INFLUENCE DE LA SUPERFICIE

8.6.3. INFLUENCE DE L'INDICE GLOBAL DE PENTE

8.6.4. INFLUENCE DE LA HAUTEUR DE PLUIE DECENNALE

8.6.5. INFLUENCE DE L'INFILTRABILITE

8.6.6. INFLUENCE DU QUESTIONNAIRE

8.6.7. CONCLUSION

9. PRATIQUE DE L'ESTIMATION DES DEBITS DE POINTE DE CRUES DECENNALES POUR DES BASSINS VERSANTS DE 1 A 10 KM²

9.1. EXAMEN DES CARACTERISTIQUES ET DE LA COUVERTURE VEGETALE DU BASSIN VERSANT

9.2. UTILISATION DU QUESTIONNAIRE

9.3. EVALUATION DES PRECIPITATIONS DECENNALES

9.4. EVALUATION DU VOLUME RUISSELE

9.5. EVALUATION DU DEBIT MAXIMUM DECENNAL DE RUISSELLEMENT

9.6. VOLUME ET FORME DE LA CRUE DECENNALE

9.6.1. VOLUME DE LA CRUE

9.6.2. FORME DE LA CRUE

9.7. EXEMPLE DE CALCUL

9.8. AUTRES POSSIBILITES D'ESTIMATION DES DEBITS DE CRUES DECENNALES

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXE 1 - LES POINTS DELICATS A EXAMINER (CHECK-LIST)

ANNEXE 2 - TABLEAUX DES CARACTERISTIQUES DES HYDROGRAMMES COMPOSES SUR LES BASSINS FICTIFS

ANNEXE 3 - QUELQUES CORRECTIONS AUX VALEURS DES CARACTERISTIQUES DE CRUES DES PETITS BASSINS VERSANTS PUBLIEES PAR RODIER (1986).

INTRODUCTION

Contrairement à ce que pourrait suggérer son titre, cet article n'est pas exactement une note de vulgarisation. L'ingénieur désireux d'obtenir une estimation rapide sans perdre de temps sur un texte long et détaillé aura intérêt à aborder directement le paragraphe 9 où il trouvera, nous l'espérons, ce qu'il cherche.

Mais pour faire suite à un premier article paru en 1986 dans les cahiers de l'ORSTOM "Caractéristiques des crues des petits bassins versants représentatifs du Sahel" (RODIER, 1986), nous avons voulu exploiter à fond les données de ces bassins représentatifs et les derniers éléments de recherche s'y rapportant pour tenter d'améliorer rapidement les méthodes d'estimation de la crue décennale pour les bassins versants de moins de 10 km².

Pour cette gamme de superficie la méthodologie donnée en 1965 était pour le moins hasardeuse ; en outre, sur le plan de la recherche, les très petits bassins se prêtent bien à l'utilisation d'un modèle global et pour différentes raisons, dont le caractère modéré de la dégradation hydrographique, les résultats sont beaucoup plus faciles à interpréter. Cependant par suite de leur exiguïté, il est très souvent impossible que les fortes averses soient unitaires, c'est-à-dire que l'on puisse considérer leur corps comme une pointe instantanée dans la méthodologie de l'hydrogramme unitaire ; ces averses doivent être découpées en tranches avec un pas de temps suffisamment court, inférieur à 5 minutes dans certains cas. Après avoir déterminé les hydrogrammes successifs correspondant à ces tranches on recompose, par addition des débits l'hydrogramme global. Cette opération délicate ne peut être faite que par un hydrologue confirmé ayant l'expérience de ces crues du Sahel. Elle est faite dans la présente étude et l'utilisateur n'aura à employer que des diagrammes moyens déduits de cette étude analytique.

Comme dans l'article visé plus haut, on s'est efforcé de présenter les résultats de telle façon qu'ils puissent servir de base pour d'autres recherches qui ne s'orienteront pas obligatoirement vers la méthodologie présentée au paragraphe 9, et de donner toutes les justifications nécessaires, ce qui alourdit considérablement ce texte.

1. LA NOTION DE "CRUE DECENNALE".

Certains s'étonneront peut-être de voir les hydrologues de l'ORSTOM étudier avec tant d'insistance et même parfois avec acharnement les phénomènes de cette fréquence. C'est au point que dans certaines synthèses à caractère géographique ils ont donné systématiquement les débits de pointe de fréquence décennale ! Il y a plusieurs raisons à cette attitude.

Qu'il s'agisse de grands ou de petits bassins ou de réseaux pluviométriques on réussit assez bien à cerner l'ordre de grandeur de la pluie et de la crue décennale. Pour les petits bassins versants après les analyses systématiques particulièrement fines de Y. BRUNET-MORET sur les données pluviométriques et pluviographiques d'Afrique Occidentale et Centrale et après les études de 1954 à 1975 d'un grand nombre de petits bassins on a certainement observé et étudié un certain nombre d'averses et de crues de fréquence décennale. On connaît assez bien cette averse et ses caractéristiques, mais on a appris aussi qu'il convenait d'être extrêmement prudent pour des fréquences plus faibles. On sait que des pluies atteignant 200 mm en 24 h. se produisent au Sahel. L'averse du 18 août 1962 sur les bassins de Boulsa ne correspondait pas à une ligne de grains mais à une barre continue ce qui tend à montrer que pour des bassins de plus de 100 km² la nature des averses à prendre en compte n'est plus la même pour des événements très rares (fréquence inférieure à la fréquence décennale). L'extrapolation des courbes de distribution devient hasardeuse au moins pour les petits bassins, au delà de la fréquence décennale. Par ailleurs, compte tenu de l'importance économique des ouvrages concernés, le choix de la crue décennale comme crue du projet ou d'une crue de fréquence voisine est très fréquent.

Pour simplifier on peut admettre la définition suivante : la crue décennale est une crue fictive dont les principales caractéristiques ont une période de retour de dix ans.

Dans certains cas, comme on le verra plus loin pour certains bassins couvrant moins de 5 km² on sera amené à considérer le débit de pointe d'une crue dont le volume a une période de retour de 10 ans, ou directement le débit de pointe correspondant à une période de retour de 10 ans. On devrait également le faire pour certains bassins beaucoup plus grands à forte dégradation hydrographique.

En général, c'est la première méthode que l'on applique implicitement, mais dans la plupart des cas la différence est très faible entre les débits de pointe correspondant à ces deux concepts, sauf les cas signalés ci-dessus. L'estimation de la crue décennale qui vient d'être définie devrait être faite après ajustement d'une loi théorique aux valeurs observées. Cette crue n'est en aucun cas une norme, mais un indicateur.

2. PROBLEME DE L'ESTIMATION DE LA CRUE DECENNALE.

L'estimation correcte du débit de pointe sur les petits bassins est difficile, même avec un échantillon de 10 ans de crue ; la valeur estimée d'une caractéristique, le débit de pointe décennal par exemple, sera différente suivant l'époque des mesures par rapport aux séries d'années sèches et humides et sera très influencée par la qualité des observations et mesures des très fortes crues. En pratique, la situation est encore plus difficile pour les bassins sahéliens représentatifs puisqu'ils n'ont été observés en moyenne que trois ans ce qui exclut un ajustement à une loi statistique.

Il ne sera pas non plus possible d'employer d'autres méthodes statistiques telles que celle du Gradex (extrapolation des débits de pointe à l'aide de la loi théorique que suivent les pluies maximales) qui nécessitent entre 5 ans et 10 ans d'observation des crues.

La méthode la plus fiable serait la simulation d'une longue série de crues à l'aide d'un modèle mathématique "pluie-débit" ajusté sur la courte série observée de fortes crues. Des tentatives ont été faites en utilisant soit un modèle à discrétion spatiale (GIRARD, 1975a ; CHEVALLIER et al., 1985), soit un modèle global simplifié (GIRARD, 1975b). Les résultats tout au moins en ce qui concerne la prédétermination des débits maximaux ont été décevants pour les raisons suivantes :

- le but recherché était non pas la simulation du débit de pointe mais celle du volume de crue ou même celle des volumes annuels ;
- les données dont on dispose pour régler les paramètres des modèles sont insuffisantes sur un bon nombre de bassins représentatifs ;
- les temps de réponse de ces petits bassins étant très courts, il faudrait utiliser des modèles avec des pas de temps très petits de l'ordre de quelques minutes ce qui n'est pas possible avec les modèles choisis et avec la précision des données sur un bon nombre de bassins ;
- dans la combinaison des apports de bassins partiels (modèle à discrétion spatiale) il faudrait éviter d'accentuer l'effet du décalage des pointes des différentes parts du bassin ;
- les connaissances concernant les processus à l'origine des fortes crues au Sahel ne sont pas encore complètes ; en particulier l'influence des averses antécédentes n'est pas établie de façon bien nette pour un certain nombre de types de sol et ceci conduit à choisir des critères inadaptés.

Il faudrait construire un modèle spécialement adapté à la prédétermination des fortes crues. Ce modèle pourrait être l'aboutissement de recherches en cours telles que les opérations de simulation de pluie qui permettraient de mieux saisir tous les mécanismes à l'origine des très fortes crues. Ce modèle s'appliquant aux bassins représentatifs dont les données seraient suffisantes pour assurer le réglage des paramètres permettrait une estimation correcte de la crue décennale définie en 1.. Certains essais faits par GIRARD montrent qu'on peut espérer parvenir à cet objectif pour les bassins les mieux pourvus en données. L'idéal serait de parvenir pour ces petits bassins du Sahel à une structure unique ce qui permettrait d'appliquer ce modèle à la plupart des autres bassins moins bien pourvus, mais ce n'est pas évident. Tout au moins, on aura pour les quelques bassins dont la détermination de la crue décennale aura été faite correctement, la possibilité de comparer ce résultat avec les valeurs obtenues par la méthodologie dont le principe sera donné au paragraphe 3.2. .

3. DETERMINATION DE LA CRUE DECENNALE PAR LE MODELE GLOBAL.

3.1. DEFINITION DU MODELE GLOBAL

Devant ces difficultés les hydrologues de l'ORSTOM ont donné une définition de la crue décennale : c'est la crue provoquée par une pluie décennale, toutes les autres conditions étant les plus fréquentes pour les fortes averses (saturation du sol, état de la végétation, forme du hyétoGRAMME de pluie). Les données dont on dispose étant les relevés pluviométriques des services météorologiques, on est amené tout naturellement à considérer la pluie décennale journalière (légèrement différente de la pluie décennale de 24 h.) même quand il faudrait considérer des pluies de plus courte durée. On verra en détail dans ce qui suit que ce choix n'est pas catastrophique. On admet en plus et en toutes connaissances de causes que le bassin est homogène ainsi que la pluie sur ce bassin, quitte à utiliser des artifices (voir questionnaire en annexe) si le bassin est trop hétérogène. Cette approche est celle du "modèle global".

Ce modèle peut s'appliquer sur des séries courtes de crues lorsqu'on dispose d'une station pluviométrique de référence à relevés de durée suffisante pour définir correctement la pluie décennale. Cette définition peut donc être appliquée à la plupart des bassins étudiés par l'ORSTOM au Sahel.

La crue issue d'un tel modèle a-t-elle une récurrence décennale ?

Il est difficile de donner une réponse correcte à cette question. On peut cependant faire les remarques suivantes :

- Comme on le verra plus loin la transposition des résultats des bassins représentatifs à d'autres bassins non observés est une opération hasardeuse (RODIER, 1982) même dans le cas assez favorable du Sahel et il ne faut pas aller chercher une précision impossible ; on doit considérer qu'une estimation à 20 % près du débit de pointe décennal est excellente. Cela n'empêche pas que les recherches doivent être conduites avec toute la rigueur souhaitable. Si sur un ou deux points de la méthodologie on bute sur un obstacle insurmontable dont le contournement fera perdre en précision un nombre de points paraissant nettement inférieur à ces 20 %, il ne convient pas, à notre avis, de se laisser troubler outre mesure.
- Le modèle à discrétisation spatiale a été calé correctement sur les lames ruisselées d'un bassin de la Mare d'Oursi (CHEVALLIER et al., 1985). La valeur décennale de cette lame ruisselée trouvée par ce modèle est très proche de celle que donne le modèle global ce qui est un bon signe. La forme de l'hydrogramme qui dans les cas les plus courants ne donne pas lieu à de très fortes inexactitudes, permet de faire correspondre à la lame ruisselée obtenue, un débit de pointe.

Au Sahel la hauteur de précipitation est de loin le facteur principal du ruissellement et comme en plus on admet une averse bien concentrée dans le temps, le risque est faible d'aboutir par la définition donnée plus haut à une pointe de crue très différente de la vraie crue décennale. Ce raisonnement ne serait pas valable lorsque l'état d'humidité antérieure du sol joue un rôle essentiel comme dans certains bassins de la COTE-D'IVOIRE par exemple.

- La crue décennale n'est qu'un indicateur statistique : il est beaucoup plus important de calculer cet indicateur "pseudo-décennal", dans le cas du modèle global sur un grand nombre de bassins avec la même méthodologie que de trouver un indicateur décennal correct qui ne pourrait être calculé que sur les bassins dont les données le permettraient. Il ne faut pas perdre de vue que l'objectif est une transposition de résultats ; or la fiabilité des méthodes de régionalisation est directement liée au nombre de bassins étudiés.

3.2. Application du modèle global à des crues observées sur un bassin représentatif :

Comme la plupart des modèles en hydrologie, le modèle global considère que les fortes crues sont le résultat de processus liés d'une part à la fonction de production des écoulements à partir

des précipitations et d'autre part à la fonction de transfert de ces écoulements à l'exutoire des petits bassins.

La définition de la crue décennale par le modèle global présente un certain degré de souplesse ; en outre suivant les objectifs des études, la qualité des données et même leur tempérament, les auteurs des rapports d'études ont pris des marges de sécurité plus ou moins confortables, surtout dans les études les plus anciennes. L'évolution des connaissances hydrologiques depuis 1955 a conduit à adopter, dans le détail des opérations, des méthodologies mieux adaptées, comme, par exemple, la méthode des déviations résiduelles qui a remplacé la détermination très empirique des facteurs du ruissellement après examen du tableau général des caractéristiques des crues.

Ceci explique que les résultats publiés par P. DUBREUIL et al. (1972) ne soient pas tout à fait homogènes car ils proviennent, directement pour la plupart, des rapports de campagne.

Les différentes étapes de calcul du débit de pointe de cette crue seront passées en revue ci-après avec la présentation chaque fois que cela sera nécessaire des acquis récents susceptibles d'améliorer cette prédétermination. On s'inspirera en partie dans ce qui suit d'un rapport inédit de RODIER (1984) établi à l'issue d'une concertation ORSTOM-OMM-CIEH.

3.2.1. Fonction de production :

Elle règle le passage de la pluie journalière décennale avec toutes ses caractéristiques à la lame ruisselée décennale. Cette opération s'effectue en trois étapes.

3.2.1.1. Détermination de la pluie décennale à un poste de référence :

Les données de Y. BRUNET-MORET (1968) peuvent être réactualisées avec les cartes récentes du CIEH sur les pluies journalières de fréquence rare. Ces cartes sont plus précises grâce à un plus grand nombre de stations et prennent en compte la période de sécheresse qui a commencé vers 1970. Cependant le travail de ALBERGEL (1986) montre que tout au moins pour les pluies journalières cette remise à jour ne devrait pas introduire de variations importantes sur la pluie décennale à adopter : les écarts entre valeurs anciennes et valeurs actualisées ne devraient pas dépasser 10 % dans n'importe quel sens, valeurs anciennes inférieures aux valeurs actuelles ou l'inverse.

Malheureusement la loi de distribution adoptée ne tient pas compte des anomalies locales (voisinage d'un relief ou d'un cours d'eau) comme c'était le cas de la distribution de Pearson III adoptée par Y. BRUNET-MORET (variation du paramètre γ suivant ces anomalies) et les rapports

ronéotypés de cet auteur sont à peu près introuvables. Quelques indications pratiques pour tenir compte de ces anomalies seraient bien utiles sous forme de corrections à apporter aux données du CIEH. Lorsque le bassin est très petit, il faut découper en tranches d'intensités l'averse principale contenue dans la pluie journalière avant de transformer ces précipitations en ruissellement. On reviendra plus loin sur ce point.

3.3.2.2. Passage de la pluie ponctuelle décennale à la lame moyenne décennale précipitée sur le bassin.

Ce passage se fait par l'intermédiaire d'un coefficient d'abattement. L'étude de G. VUILLAUME (1974) fournit ce coefficient en fonction de la surface du bassin, de la hauteur pluviométrique moyenne annuelle et de la période de retour choisie. Dans les rapports antérieurs à 1974 ce coefficient a été déterminé de façon très empirique à partir de quelques observations ; il est généralement un peu trop faible d'où des lames précipitées sur le bassin légèrement sous estimées (RODIER, 1984).

3.3.2.3. Transformation de la lame précipitée en lame ruisselée décennale.

Comme le note DUBREUIL (1986) tous les chercheurs ont effectué cette transformation en établissant des relations analytiques à partir des grandeurs mesurées lors des événements "averses-crues". Il faut noter que cette étude des relations était extrêmement sommaire pour les premiers rapports. Ces relations analytiques donnent à partir de la lame précipitée soit le coefficient de ruissellement K_r (ce qui suppose que l'on sépare le ruissellement superficiel de l'ensemble de l'écoulement) soit la lame ruisselée L_r (inférieure à la lame écoulée L_e) en fonction explicitement ou non d'un indice d'humidité préalable et parfois d'autres facteurs secondaires. Elles sont en général établies par voie graphique, avec la méthode des déviations résiduelles pour les rapports les moins anciens. Dans le modèle global on déduit donc la lame ruisselée décennale de la pluie moyenne décennale et d'une valeur voisine du mode, de l'indice d'humidité (correspondant en général à un intervalle de deux jours après une assez forte pluie). Cela équivaut à extrapoler la courbe moyenne lame ruisselée-lame précipitée jusqu'à la valeur de la lame précipitée décennale avec la valeur la plus fréquente de l'indice d'humidité. Dans un petit nombre de cas la plus forte pluie observée a dépassé la pluie décennale de sorte que cette extrapolation est alors très faible ou nulle.

On doit signaler que jusque vers 1958 on a assez souvent utilisé pour estimer la lame d'eau ruisselée le concept de la capacité moyenne d'infiltration ou mieux de la capacité d'absorption moyenne C_{am} qui représente en mm/h la quantité d'eau infiltrée plus la détention superficielle, les pertes immédiates par évaporation, le remplissage du lit, etc.. Ce concept a été utilisé pour des

bassins non homogènes et la même approche actuellement se traduirait probablement par un modèle à réservoirs. Mais on s'est vite heurté à des problèmes redoutables : l'hétérogénéité spatiale des diagrammes d'intensité de pluie, la délimitation sur un bassin des zones correspondant à diverses infiltrabilités et la détermination des variations de cette infiltrabilité d'une de ces zones à une autre.

L'emploi du minisimulateur redonnera peut-être de l'actualité à cette approche.

Cette transformation des hauteurs de précipitation en ruissellement n'a pas toujours été effectuée avec toute la précision et même l'exactitude souhaitable pour les trois raisons suivantes : l'extrapolation pour atteindre le coefficient de ruissellement de l'averse décennale a parfois été très forte et par conséquent des marges de sécurité importantes ont dû être prises ; la séparation entre ruissellement superficiel et écoulement retardé n'a pas été faite suivant des critères uniformes (parfois pour des bassins à écoulement retardé faible, elle n'a pas été faite) ; enfin on ignorait l'importance de l'écart entre pluie au sol et pluie dans le pluviomètre "Association" ; or au Sahel cet écart peut atteindre 30 % dans certains cas, la limitation du coefficient de ruissellement d'une pluie journalière mesurée au pluviomètre "Association" à un peu moins de 100 % était donc arbitraire.

Tout ceci a été revu pour les bassins de moins de 12 km². On a trouvé par rapport aux chiffres publiés dans le recueil de P. DUBREUIL et al. (1972) des écarts pouvant atteindre 20 %. On reviendra sur cette question au point 6.

La formation des fortes crues est-elle affectée par la sécheresse ? ALBERGEL et VALENTIN (1986) ont montré que entre 1960-1962 et 1984 il y avait sur un bassin représentatif une augmentation du coefficient de ruissellement par suite de la transformation de l'état de surface : dégradation de la couverture végétale et généralisation d'une organisation pédologique superficielle nettement imperméable.

3.2.2. Fonction de transfert.

Cette fonction du modèle global permet le calcul des caractéristiques de forme de la crue décennale (temps de montée, temps de base, débit de pointe) à partir de la lame ruisselée déterminée plus haut.

Pour presque tous les petits bassins représentatifs du Sahel ce calcul a été fait par l'application de la méthode de l'hydrogramme unitaire qui, en principe, ne concerne que le ruissellement superficiel prédominant dans ces régions.

La théorie de l'hydrogramme unitaire impose des averses courtes et intenses ce qui est souvent le cas au Sahel. L'averse doit couvrir d'une manière relativement homogène l'ensemble du bassin ce qui élimine pour le Sahel des bassins de superficies excédant 100-200 km².

Cette méthode n'a pas de base très rigoureuse puisqu'elle suppose que l'écoulement en nappe sur le sol et l'écoulement dans le réseau hydrographique conservent, chacun, une vitesse constante quelle que soit l'importance de la lame ruisselée et l'intensité de la pluie ; cela est manifestement faux, mais on a tourné cette difficulté en ne tenant compte pour la détermination de l'hydrogramme que des fortes crues, les faibles crues présentant un hydrogramme beaucoup plus mou.

Ce qu'on détermine, c'est l'hydrogramme "unitaire instantané" qui théoriquement se rapporte à une averse infiniment courte.

En fait une averse durant la moitié du temps de montée conduit au même hydrogramme unitaire pour un ruissellement de 10 mm que l'hydrogramme instantané pour la même lame de ruissellement. Si l'averse efficace (seule partie qui donne lieu au ruissellement) dure plus de la moitié du temps de montée on la découpe en tranches de durée plus courte et on additionne les ordonnées des hydrogrammes des différentes tranches.

En appliquant les règles d'additivité et de linéarité de l'hydrogramme unitaire on trouve le temps de montée, le temps de base (ne pas prendre les valeurs moyennes faussées par des hydrogrammes plus ou moins anormaux pour des raisons connues) et un coefficient α (débit maximal de ruissellement de la crue divisé par le débit moyen de ruissellement pendant le temps de ruissellement (ou temps de base) de la crue. Ce coefficient α a une valeur homogène et caractéristique de la crue unitaire d'un bassin considéré (DUBREUIL, 1986). Les caractéristiques de forme des bassins représentatifs doivent être déterminées de façon rigoureuse et avec une méthodologie uniforme ; ce n'était pas le cas pour la plupart des rapports de bassins représentatifs.

On trouvera au point 8 les résultats de la révision du calcul de ces caractéristiques pour les bassins de moins de 12 km².

Rien que pour les hydrogrammes instantanés dans le recueil des données de base de DUBREUIL et al. (1972) les valeurs de α sont comprises entre 1,8 et plus de 7 au Sahel. Les valeurs révisées par RODIER (1986) sont comprises entre 2 et 3,6 en précisant de plus les conditions du bassin qui correspondent aux deux limites extrêmes. Ceci montre l'intérêt d'une révision de l'ensemble de ces caractéristiques en appliquant rigoureusement la même méthodologie.

4. TRANSPOSITION, APPLICATION A DES BASSINS NON JAUGES.

4.1. Considérations générales :

C'est une opération qui demande beaucoup de soins (RODIER, 1982) et n'est possible dans de bonnes conditions que pour certains types de climat et de facteurs géomorphologiques. Théoriquement pour que deux bassins versants présentent les mêmes caractéristiques hydrologiques il faudrait que la totalité des facteurs de l'écoulement soit identique. Or ceux-ci sont innombrables ; DUBREUIL et VUILLAUME (1975) en ont donné une liste à peu près exhaustive que nous ne reprendrons pas ici ; c'est pourquoi on rappelle souvent la boutade suivante "un bassin représentatif n'est représentatif que de lui-même". En fait, certaines différences peuvent être négligées et d'autres peuvent donner lieu à des corrections simples de sorte que dans un bon nombre de cas on peut arriver par transposition à des résultats acceptables dans des limites de précision correspondant à la nature des applications pratiques.

Le cas du Sahel, tout au moins pour les petits bassins, est favorable. Pour la crue décennale, les facteurs les plus significatifs tels qu'ils résultent d'une longue pratique des relations pluie-écoulement dans cette région sont : la superficie du bassin versant, la forme et la hauteur de l'averse décennale, l'infiltrabilité du sol, le relief. En fait, on emploie parfois dans l'étude des relations pluie-débit des facteurs plus accessibles ou faciles à quantifier : par exemple, la hauteur de l'averse décennale est remplacée par la hauteur journalière décennale ou même la hauteur de pluie annuelle, le relief par l'indice global de pente défini par DUBREUIL (1965), ou par un indice un peu plus complexe tenant compte s'il y a lieu des pentes transversales, etc.. La couverture végétale au Sahel et l'utilisation du sol dans le cas général ne jouent pas un rôle important ; mais ceci n'est pas toujours le cas et il en sera question plus loin.

- Les éléments favorables à la transposition sont les suivants : les événements pluvieux à l'origine des fortes averses sont : des orages convectifs tropicaux avec des diagrammes d'intensité très voisins (sauf pour le littoral) survenant au cours d'une saison des pluies bien déterminée. En première approximation on peut remplacer la hauteur de l'averse par la hauteur journalière.
- Le ruissellement superficiel est largement prédominant comme on l'a vu plus haut.
- La couverture végétale est peu dense et les superficies en culture sont peu étendues.
- Les types de sols ne sont pas très nombreux. Les paysages sont les mêmes sur de très grandes étendues.

4.2. Méthodologies de transposition.

S'inspirant de ce qui précède, deux méthodes d'estimation de la crue décennale (RODIER et AUVRAY, 1965 ; PUECH et CHABI-GONNI, 1984) ont été mises au point à partir des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux de l'ORSTOM. Ces deux méthodes se différencient surtout par les techniques de sélection des variables.

La première méthode, résolument déterministe est basée sur l'application du modèle global. La formule suivante résume les opérations successives :

$$Q_{10} = K \cdot P_{10} \cdot K_{r10} \cdot \alpha \cdot S / T_b$$

Q_{10} = débit de pointe de la crue décennale

K = coefficient d'abattement

P_{10} = hauteur de pluie journalière décennale

K_{r10} = coefficient de ruissellement de la crue décennale

α = débit de pointe de la crue/débit moyen de ruissellement pendant T_b .

S = surface du bassin

T_b = temps de base de la crue décennale (durée du ruissellement superficiel)

K_{r10} , T_b , K et α sont obtenues par des abaques en fonction de la surface, de l'infiltrabilité globale (pour K_{r10}) et du relief.

L'infiltration globale n'est pas quantifiée (c'était impossible à l'époque), mais les bassins sont répartis en cinq classes d'infiltrabilité : la catégorie P1 correspond à un sol parfaitement imperméable et rigoureusement plan qu'on ne rencontre jamais dans la pratique. La catégorie P5 correspond à des sols très perméables. La méthode permet aussi de prédéterminer le temps de montée.

On n'emploie pas explicitement la formule plus haut mais on procède par étapes successives de façon à pouvoir contrôler les divers éléments de calcul et à les corriger s'il y a lieu, pour le cas où une caractéristique non prise en compte, la longueur anormale du bassin par exemple, ou un réseau hydrographique bien en éventail, conduirait à une majoration ou à une réduction de l'élément tel qu'il est déterminé par le calcul.

On donne des indications pour les bassins trop petits pour que la crue décennale puisse être considérée comme unitaire.

La méthode de PUECH et CHABI GONNI partant des valeurs des débits de pointe de la crue décennale données par DUBREUIL et al. (1972) est basée sur une sélection des variables explicatives à l'aide de régressions multiples. Deux formules sont données pour le Sahel suivant que l'on estime ou non le coefficient de ruissellement de la crue décennale (estimé à partir de données géologiques, ce qui est assez discutable) :

$$Q_{10} = a \cdot S^b \cdot Kr_{10}^c \cdot Ig^d$$

$$Q_{10} = a \cdot S^b \cdot Ig^c \cdot P_{10}^d$$

Ig : indice global de pente

a, b, c, d : coefficients numériques déterminés par les auteurs.

S, Kr_{10} et P_{10} : voir définitions données ci-dessus.

La plupart des hydrologues ne manqueront pas de s'étonner de voir une formule donnant Q_{10} sans tenir compte directement ou non de P_{10} et une autre qui ne prend pas en compte l'infiltrabilité. Ceci s'explique cependant car P_{10} varie en général de 60 à 105 mm et l'intervalle est beaucoup plus faible si on élimine les régimes désertiques et subdésertiques.

L'écart relatif est plus faible que l'écart qui résulte couramment d'une mauvaise estimation de l'infiltrabilité. Pour la seconde formule (sans Kr_{10}) la plupart des bassins représentatifs de l'ORSTOM ruissellent bien parce qu'on s'est attaché à étudier des types de bassin fournissant de fortes crues.

Dans les régressions multiples, le poids des bassins perméables est faible (ils sont en très petit nombre). La seconde formule sous-estimera les crues décennales pour les bassins très imperméables et les surestimera fortement pour les bassins perméables.

Les facteurs du ruissellement choisis (surface, indice global de pente, critère d'infiltrabilité) sont significatifs. Les auteurs des deux méthodes ont été d'accord pour reconnaître que le critère d'infiltrabilité est très important. Sa mauvaise estimation est une des deux plus grandes causes d'erreur dans l'application des deux méthodes. La seconde cause d'erreur provient de bassins dont les facteurs non pris en compte s'écartent beaucoup des conditions moyennes. Il est à noter que de tels facteurs peuvent conduire à des erreurs de 100 à 200 % sur les débits de pointe. Elles sont un peu plus fréquentes dans la seconde méthode pour laquelle trop peu de facteurs sont pris en compte. Par contre la seconde méthode qui s'affranchit de l'hydrogramme unitaire laisse espérer l'estimation de crues décennales pour des bassins dont la surface dépasse nettement 100 km².

4.3. Possibilités d'amélioration :

Quelle que soit la méthodologie appliquée, on arrive à une estimation à peu près acceptable dans de très nombreux cas mais l'application brutale de ces méthodologies sans examen du bassin peut conduire à des erreurs inacceptables.

On envisage d'améliorer la situation par les mesures suivantes :

- mise au point d'un répertoire des aptitudes au ruissellement des couches superficielles du sol (à partir des mesu. es au simulateur de pluies),
- mise au point d'un questionnaire (check list) à utiliser avant application de toute méthode. Il prend en compte les paramètres n'entrant pas dans la méthodologie de calcul,
- préparation d'un manuel pratique concernant les travaux de terrain et les pratiques de calcul,
- à titre de mesure transitoire, remise à jour des règles de calcul des méthodologies présentées en 4.2.

5. MESURES POUR L'AMELIORATION DE L'ESTIMATION DE LA CRUE DECENNALE.

5.1. Programme FORCRUSA :

Plus que l'amélioration de la précision dans les cas courants, c'est le risque de très fortes erreurs qu'il convient d'éliminer. C'est pourquoi dans le programme de recherche qui a été mis au point d'un commun accord entre OMM, CIEH et ORSTOM en 1984, on a insisté tout particulièrement sur ce point en préconisant deux opérations très importantes : la mise au point du répertoire d'aptitude au ruissellement et le questionnaire.

Ce programme qui a pris depuis le nom de code FORCRUSA comprend plusieurs points : la mise au point d'une ébauche du répertoire d'aptitude au ruissellement, la révision des valeurs Kr_{10} surtout pour les plus petits bassins, la révision des paramètres de l'hydrogramme décennal, l'élaboration de bases pluviographiques, la préparation d'une première ébauche du questionnaire préliminaire, la définition des règles de calcul de la crue décennale.

Il s'agit donc de mesures urgentes en vue d'éliminer de très fortes erreurs dans l'application des méthodes actuelles et d'améliorer les éléments de calcul pour les très petits bassins pour lesquels les abaques mise au point en 1965 étaient pour le moins hasardeuses. Dans toute la mesure du possible ces travaux doivent donner dans le futur des résultats acceptables quelle que soit la méthodologie qui sera adoptée en définitive.

Cela alourdit les recherches et surtout la présentation des résultats mais évite de reprendre deux fois les opérations préliminaires délicates à partir d'archives qu'il est parfois difficile d'utiliser vingt ans après la rédaction des premiers rapports.

5.2. Répertoire :

Les notes anciennes utilisent une classification qualitative d'infiltrabilité de P1 à P5, évoquée au point 4.2, imaginée dans son principe par C. AUVRAY. Elle a rendu de grands services pendant 20 ans mais elle ne peut guère être utilisée que par des hydrologues confirmés et son caractère qualitatif n'est pas sans danger. Pour les bassins observés la classification en Pi était effectuée généralement par la valeur de la pluie limite en dessous de laquelle il n'y a pas de ruissellement (deux jours après une assez forte pluie) malheureusement ceci n'était pas possible pour les bassins non observés.

Or le nombre de formations superficielles, y compris les roches, existant au Sahel est faible et on sait bien maintenant déterminer leur aptitude au ruissellement grâce au minisimulateur ; on peut même, sous certaines conditions souvent réalisées, établir la relation entre résultats sur parcelles et résultats sur bassins représentatifs par reconstitution des valeurs du ruissellement du bassin après composition des résultats pour différents états de surface observés. On a donc projeté un répertoire des aptitudes au ruissellement des couches superficielles du sol rédigé en termes clairs et donnant pour chaque type d'état de surface un ou plusieurs indices quantitatifs liés à l'aptitude au ruissellement. Les travaux sur le terrain comportent de nombreuses mesures au minisimulateur sur divers types d'état de surface dans des bassins représentatifs déjà étudiés.

Ces travaux sont très avancés puisqu'ils couvrent toute une série de valeurs d'infiltrabilité depuis les sables très perméables de Niamey où le ruissellement est nul (ancienne valeur P5) jusqu'à des sols très imperméables (ancien indice P2-P1). Plus ou moins explicitement certains des résultats ont été utilisés dans la présente note mais les travaux de terrain ne sont pas terminés car ils n'ont pas pu bénéficier de tout le financement espéré de sorte que la présentation des sections 6,7 et 8 sera à revoir quand le répertoire sera au point.

5.2. Questionnaire préliminaire (Check list)

Ce questionnaire procède à une triple classification : suivant la catégorie de surface du bassin, suivant le type d'averse dominant et suivant la dégradation hydrographique ; ensuite il examine un certain nombre de conditions extrêmes concernant la forme du bassin, la nature du réseau hydrographique, la présence ou non de rupture de pente (avec présence de zone marécageuse ou non) l'hétérogénéité du bassin (nécessitant de procéder à l'étude sur un bassin réduit), la rugosité du sol, la présence de végétation assez dense, l'influence de l'homme. Les méthodologies les mieux adaptées sont indiquées et les corrections à effectuer sont précisées dans un bon nombre de cas ; elles sont indiquées par X% lorsque le problème est encore à l'étude et qu'il n'est pas possible de chiffrer pour le moment de corrections même à titre indicatif. C'est le cas pour des bassins versants affectés par la dégradation hydrographique qui au Sahel pose de sérieux problèmes surtout pour des bassins dépassant 25 Km².

On trouvera en annexe 1 une première ébauche de ce questionnaire élaborée après enquête à l'ORSTOM et à l'OMM. Des oublis ne sont cependant pas exclus et ce questionnaire sera remis à jour périodiquement.

6. REVISION DES COEFFICIENTS DE RUISSELLEMENT DECENNAUX

Cette opération a été terminée en 1985 et les résultats ont été publiés dans les cahiers de l'ORSTOM (RODIER, 1986).

Cette étude devait être limitée à des superficies proches de 5 Km². En fait, la nécessité de couvrir la quasi totalité des cas où le bassin est trop petit et la pente trop forte pour que l'averse décennale soit unitaire (c'est-à-dire que la forme de l'hydrogramme soit indépendante de la durée et des intensités de l'averse a conduit à couvrir la totalité des bassins contrôlant jusqu'à 10 Km²) ; pour plus de sécurité dans l'établissement des courbes de variations du coefficient du ruissellement il a même été nécessaire de revoir les caractéristiques d'un certain nombre de bassins couvrant plus de 10 Km². De légères retouches ont été apportées à certaines valeurs de K_r publiées dans le cahier ORSTOM précité (voir 8.5.).

Les données géographiques des bassins étudiés et les caractéristiques des crues après révision sont données dans les tableaux I et II.

TABLEAU I
SITUATION ET CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES BASSINS ETUDIES

Bassin	Pays	Coordonnées Lat. & Long.	Super- ficie km ²	Substra- tum	Sol	Indice Pi
Tikaré I	Burkina Faso	N 13°17' W 1°42'	0,11	Sc	E + Grav	R.Imp/P
Kountkouzout S.S.	Niger	N 14°50' E 5°39'	0,27	Grs + Ca	E + Sp	R.Imp
In Tiziouen II	Niger	N 17°09' E 8°06'	0,67	Gra + Gn	E + A + Rg	Imp
Ansouri	Burkina Faso	N 13°18' W 1°45'	0,69	Sc	E + Ag	R.Imp
Kountkouzout S.B.	Niger	N 14°50' E 5°37'	0,71	Grs + Ca	E + Sp + Grav	
Jalafanka	Burkina Faso	N 14°35' W 0°30'	0,81	Gra	Agl	Imp
Mogodé B.	Cameroun	N 10°35' E 13°35'	0,94	Gra	S + Spp + V	R.Imp
Niamey VI	Niger	N 13°33' E 2°07'	1,0	S + Grs	S + Rs	P/R.Imp
Kolel	Burkina Faso	N 14°34' E 0°28'	1,05	Ga	E	R.Imp/P
Mogodé A	Cameroun	N 10°34' E 13°35'	1,08	Gra	B + S + <u>V</u>	P/TP
Niamey BAO-T	Niger	N 13°31' E 2°06'	1,54	S	S + <u>I</u>	TP
Sofoya V	Tchad	N 16°04' E 20°56'	1,63	Gra + Grs	Rg + Gl + <u>E</u>	Imp
In Tiziouen I	Niger	N 17°09' E 5°37'	1,87	Gra + Gn	E + A + Rg	Imp
Tikaré II S.S.	Burkina Faso	N 13°17' W 1°42'	2,36	Sc	E + Grav	R.Imp/P
Kaouara (réduit)	Niger	N 14°06' W 5°41'	2,5	Cont. T	M	Imp/T.Imp
Diam Nadié	Sénégal	N 14°44' E 17°08'	2,6	Ca	Ag	Imp/R.Imp
In Azena	Niger	N 17°09' E 5°37'	2,6	Gra + Gn	E + A + Rg	Imp
Pô	Mauritanie	N 15°47' W 12°28'	2,7	Sc + <u>Grs</u>	Ag + <u>S</u>	Imp
Bodéo	Burkina Faso	N 14°08' W 10°38'	3,45	Sc	Gl	Imp
Bouloré	Cameroun	N 10°38' E 14°18'	3,75	Rv	E + Ag	R.Imp/Imp
Kereng	Cameroun	N 9°49' E 14°00'	4	Sc	Ag	R.Imp/Imp
Leleng	Cameroun	N 10°43' E 14°13''	4	Gra	E + A + Gl	R.Imp

TABLEAU I (suite)

SITUATION ET CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES BASSINS ETUDIES

Bassin	Pays	Coordonnées Lat. & Long.	Super- ficie km ²	Substra- tum	Sol	Indice Pi
Tambiougou	Burkina Faso	N W (12°00') (1°40')	5,6			
Kourien Doulien	Tchad	N E 17°09' 21°37'	7,8	Grs	E + Rs + S	R.Imp/Imp
Sinkoroni	Mali	N W 13°53' 4°13'	8,9	Grs	E + Rs + Spp	R.Imp
Polaka	Burkina Faso	N W 14°35' 0°39'	9,14	Gra	E + S + Gl + A + Sp + Grav	R.Imp
Tchalol	Burkina Faso	N W 14°34' 0°37'	9,28	Sc + Gra	E + Gl + V + S	Imp
Oued Ali	Mauritanie	N W 17°48' 12°17'	10,4	Grs	E + S + Ag	R.Imp/Imp
Taraïman	Tchad	N E 14°34' 20°50'	11,2	Gra	Rg	Imp
Abou Goulem	Tchad	N E 13°35' 21°40'	12,3	Gra + Gn	E + A + S	P
Outardes	Burkina Faso	N W 14°35' 0°32'	16,5	Ga	E + Gl + V + S	Imp
Gountouré	Burkina Faso	N W 14°38' 0°24'	24,6	Gra	GL + Grav + V + R _s	Imp/T.Imp

LEGENDE DU TABLEAU I

Substratum :

- Ca : Calcaires (calcaires marneux dans les trois cas)
- Cont.T : Continental Terminal
- Ga : Gabbros
- Gn : Gneiss
- Gra : Granit ou roches du même type
- Grs : Grès
- S : Sable
- Sc : Schiste
- Rv : Roche verte

Sol :

- A : Arène avec ou sans pellicule imperméable
- Ag : Sol argileux
- Agl : Sol argilo-limoneux
- B : Banquettes
- E : Eboulis, roches démantelées ou très fissurées, cuirasses démantelées
- Gl : Glacis
- Grav : Gravillons
- I : Zones imperméables artificielles
- M : Marnes ou colluvions marneuses
- Rg : Reg
- Rs : Rocher sain ou à peu près
- S : Sables en général perméables
- Sp : Sables à pellicule relativement perméable
- Spp : Sables peu profonds
- V : Vertisols

Une lettre soulignée (E) signifie que la formation considérée ne couvre qu'une faible ou très faible partie du bassin. Pour certains bassins les indications substratum et sol sont données avec réserve, car les très petits bassins sont parfois des bassins secondaires dont les états de surface n'ont pas toujours été étudiés en détail.

Indice Pi :

T.Imp : Rigoureusement imperméable, c'est-à-dire suppose une surface imperméable et plane (aire de ruissellement en béton non fissuré et bien faite) ; on ne rencontre dans la nature que des cas intermédiaires. P2 (P1).

Imp : Bassin imperméable. 85 à 90 % au moins de la surface sont constitués par des sols imperméables au moins en surface : rochers très sains et sans trop de rugosité, reg, glacis, colluvions argileuses, argiles même avec fentes de retrait, sols sablo-argileux, argilo-sableux ou même sableux avec pellicule superficielle imperméable et stable.

R.Imp : Relativement imperméable. Mélange de sol imperméable et de sol perméable (voir plus loin), sols imperméables mais avec un peu de végétation, recouvrement gravillonnaire d'épaisseur notable, sols avec pellicule imperméable fragile, certaines arènes granitiques.

P : Sols perméables. Certains éboulis avec produits de décomposition assez peu perméables, roches très diaclasées et disloquées si la pente n'est pas négligeable, sols sableux sans pellicule imperméable ou avec couvert végétal de graminé, sables grossiers.

TP : Très perméable ; cuirasses latéritiques démantelées, éboulis, certains sables éoliens ou sables sans pellicule imperméable et un peu de végétation.

TABLEAU II

CARACTERISTIQUES DES CRUES DES PETITS BASSINS VERSANTS REPRESENTATIFS SAHELIENS

Bassins	S Km ²	lg _{cor}	Tm min.	Tb min.	$\frac{Q_{max r}}{Q_r}$	Kr10	Kr70mm (a)	Kr100mm (a)	Indices
TIKARE I	0.113	75	7-10	20-30	2.5-2.6	24	21.5	24	P3 (P4)
KOUNTK. SS	0.265	(50)	7-8	22-25	2.3-2.4	48.2	45,7	53,1	P3
IN TIZ. II	0.67	61(d)	4-5	25-30	2.5 ?	70	74	(80)	P2
ANSOURI	0.69	22	27	70	2.7	26	21	25	P3
KOUNTK. SB	0.71	23	30	72	2.5-2.6				
JALAFANKA	0.81	7	30-35	200	3.6	60	59.5	64	P2
MOGODE B	0.94	30	40	100-110	2.5	27	25,8	30	P3
NIAMEY VI	1.0	10?	7-10	60	2.5	21	14	18	P4 P3
KOLEL	1.05	75(d)	12-13	55-60	3.3-3.4	23.5	21	25	P3 P4
MOGODE A	1.08		75			10-12	10	10-12	(P4 P5)
NIAMEY BAO Tr.	1.54	9	10	35		8.5	7	8.5	P5
SOFOYA V	1.63	20	13-14	60		(50)	52	(60)	P2
IN TIZ. I	1.87	25(d)	15-18	45-55	2.4-2.5	64	70	(75)	P2
TIKARE II	2.36	(40)	20	70	2.5	18.5	14	18.5	P3 P4
KAOUARA-réduit	2.5	18	20	90-95	3	69	66	71	P2 P1
DIAM-NADIE	2.6	10,8	50	210	2.4	(46.5)	(40)	(42)	P2 P3
IN AZENA	2.61	27(d)	10	75	2.4	57	63	68	P2
PO	2.71	12,8(d)	25-30	90-100	2.2-2.4	61	58	62.5	P2
BODEO	3.45	6.6	65	185-190	2.05-2.10	56	53	59	P2
BOULORE	3.75	58	10	50	2.3	45	41	44.5	P3 P2
KERENG	4.(c)	37(d)	6-7	60	2.2-2.3	44.5	40	45	P3 P2
LELENG	4	45	10-15	55-60	2.3-2.4	32.5	21.4	31.3	P3
TAMBIOUGOU	5.6		60	240					
KOURIEN-DOULIEN	7.8	73(d)	35	110	(2)	(38)	(41.5)		P3 P2
SINKORONI DSP (b)	8.9	18	20-30	120	2.8	16	14	17	P3
SINKORONI FSP (b)			50-55	140-160	2.6	26.4	25	27	P3
POLAKA	9.14	15.5(d)	45-55	110-130	2.8	26	25	30	P3
TCHALOL	9.28	15(d)	45-55	145-150	1,9	50.5	46,8	52,5	P2
OUED ALI	10.4	15	25	130-140	2.4	36.5	35	40	P3 P2
TARAIMAN	11.2	3	270	840	2	48.5	47.5	50	P2
ABOU GOULEM	12.3	14(d)	30	90-100	2,6	18	14.3	18.5	P4
OUTARDES	16.5	7.2	75	280-300	2.1	40.5	37.5	53	P2

a) 70 mm ponctuel 100 mm ponctuel

b) DSP : début de saison des pluies, FSP : fin de saison des pluies

c) 3 à 3,5 actifs

d) lg_{cor} ≠ lg

Les courbes représentant K_r en fonction de la superficie, de l'indice de pente $I_{g_{cor}}$ (ou de la classe de relief R_i correspondante) et de l'infiltrabilité représentée par P_i (classe de perméabilité) avaient été tracées pour trois averses différentes :

1°) Averse décennale correspondant à la situation du bassin représentatif dans une zone climatique donnée, elle varie au Sahel entre 60 et 110 mm.

L'utilisation de ce genre de réseau de courbes explicable par le petit nombre de données existant autrefois est caractérisée par un manque de rigueur qu'on ne peut plus admettre maintenant ; cette remarque explique que d'autres valeurs de K_r seront publiées dans cette note (K_r décennal désignées par K_{r10}).

2°) Pluie décennale ponctuelle de 100 mm journalière, corps à plus de 12 mm/h correspondant à 75 % de l'averse environ, deux jours après une averse de 30 mm vers le début de la saison des pluies sauf pour les bassins à sols sableux peu profonds ou assimilés où on admet que cette averse survient un peu plus tard. Cette pluie journalière correspond à l'isohyète annuelle 600-700 mm. Les valeurs de K_r sont désignées par K_{r100mm} .

3°) Pluie décennale ponctuelle de 70 mm journalière, les autres conditions restant les mêmes. Cette pluie journalière correspond à l'isohyète 200 mm en principe. Les valeurs de K_r sont désignées par K_{r70mm} .

La première série de courbes n'a été tracée que pour permettre les comparaisons avec le réseau de courbes correspondant de la note de 1965. Dans la pratique, seuls les réseaux de courbes 2°) et 3°) seront utilisés. On détermine l'averse décennale journalière et on interpole en fonction de cette averse entre deux courbes R_i et P_i correspondant aux caractéristiques du bassin. On a reproduit sur les figures 1 et 2 les réseaux de courbe K_{r100} mm et K_{r70} mm. Elles constituent une sérieuse amélioration des courbes anciennes qui avaient été tracées avec moins de données et une connaissance beaucoup plus superficielle du ruissellement au Sahel.

Remarques importantes :

En l'absence du répertoire des aptitudes au ruissellement on avait repris les classes d'infiltrabilité P_i anciennes. Dans ce qui suit, on désignera les classes P2, P3, P4 : par bassin imperméable, Imp, pour P2 ; bassin relativement imperméable R Imp. pour P3 ; bassin perméable P pour P4. Les définitions sont présentées dans la légende du tableau I.

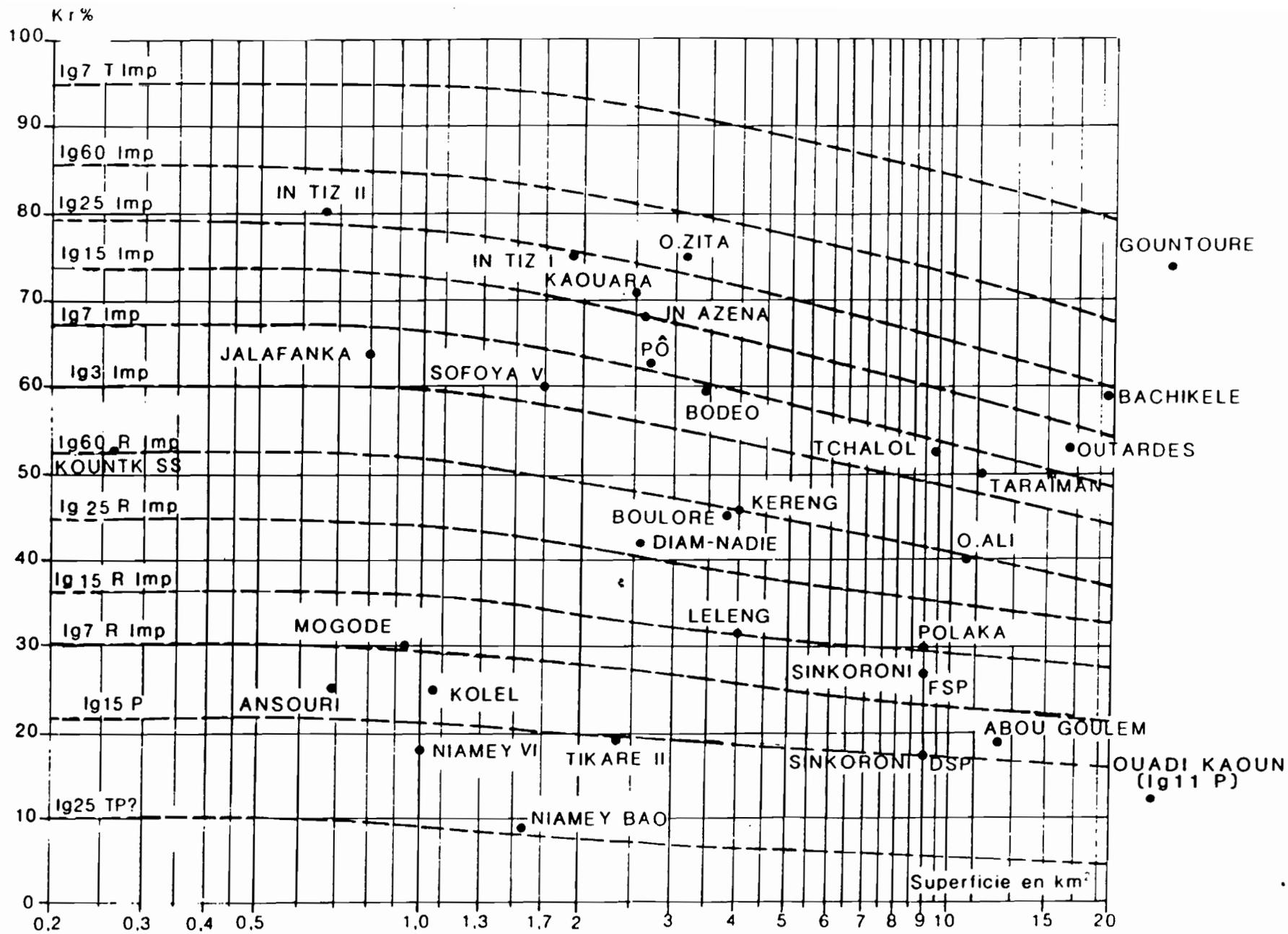


Fig-1- REGIMES SAHÉLIENS ET SUBDESERTIQUES
 COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT POUR PRÉCIPITATION PONCTUELLE H = 100 mm

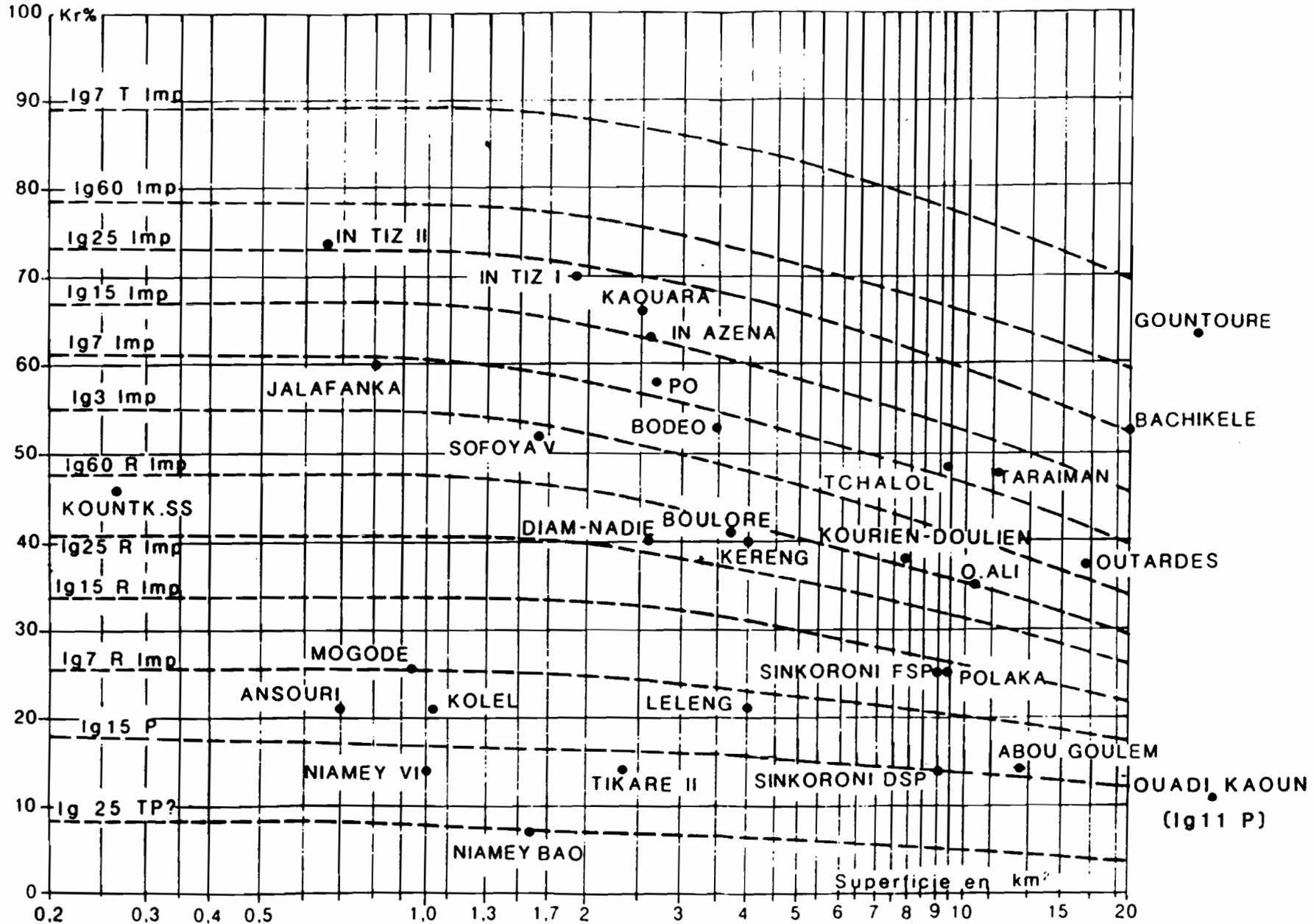


Fig-2- REGIMES SAHELIENS ET SUBDESERTIQUES
 COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT POUR PRECIPITATION PONCTUELLE H = 70mm
 (Tonnade simple + averse secondaire)

Ce changement d'indice n'apporte bien entendu aucun élément nouveau à la classification des bassins suivant leur infiltrabilité. Des quantités d'hydrologues ont utilisé cette division des bassins en trois catégories. Les tables de STRANGE utilisées aux Indes il y a bien longtemps classaient déjà les bassins en "bons", "moyens", et "mauvais" (les bons étant ceux qui ruisselaient bien). Mais avec le répertoire on pourra, d'une part classer les bassins d'après des indices non subjectifs et d'autre part adopter des indices quantitatifs.

Les pentes peuvent être caractérisées par l'indice de pente corrigé : c'est l'indice global de pente avec longueur du rectangle équivalent limitée à celle du plus long tributaire et correction pour pentes transversales relativement fortes s'il y a lieu. On note les correspondances suivantes :

R6 - $I_{g_{cor}} = 60$; R5 - $I_{g_{cor}} = 25$; R4 - $I_{g_{cor}} = 15$.

R3 - $I_{g_{cor}} = 7$; R2 - $I_{g_{cor}} = 3\text{m/km}$

La netteté des courbes des figures 1 et 2 ne doit pas faire illusion sur la précision avec laquelle on a déterminé ces coefficients de ruissellement : elle ne dépasse pas 5 %.

Cependant pour plus de rigueur dans les opérations de la section suivante on est parti des originaux de ces réseaux de courbes qui présentent de très légères différences avec celles des figures 1 et 2 pour des questions de dessin et on a parfois pris trois chiffres significatifs pour $Kr_{100\text{mm}}$ ou $Kr_{70\text{mm}}$. On pourrait donner une expression mathématique à ces courbes. Nous en avons donné un exemple dans l'article du cahier d'hydrologie précité, mais à priori ce n'est pas obligatoirement la meilleure. Il vaudrait mieux attendre pour cela que les valeurs de Kr soient révisées jusqu'à $S = 50\text{-}60 \text{ km}^2$ lors de la synthèse générale des bassins représentatifs de l'ORSTOM.

La partie droite des courbes risque d'être légèrement modifiée sans que pour les superficies inférieures à 10 km^2 les modifications qui en résulteront puissent atteindre 5 %.

En conclusion on peut se servir de ces courbes mais il ne faut pas que le lecteur soit troublé par de légères différences dans les applications qui en seront faites plus loin.

7. FORME DE L'HYDROGRAMME, TEMPS DE MONTEE, TEMPS DE BASE, COEFFICIENT DE POINTE

7.1. Facteurs influençant la forme de l'hydrogramme :

Il est important de les passer en revue car certains d'entre eux qui seraient peu significatifs dans une étude de régressions multiples peuvent, s'ils prennent des valeurs extrêmes, modifier très largement la forme de l'hydrogramme. Si les autres facteurs restent dans la moyenne par rapport à l'ampleur des variations possibles, la superficie et la pente, dans les études faites au Sahel, se sont avérées les facteurs les plus significatifs. La forme du bassin joue un rôle très important : depuis le bassin en deux parties séparées par un pédoncule conduisant à deux hydrogrammes qui tendent à se rapprocher lorsque la hauteur de l'averse augmente, on trouve tous les intermédiaires jusqu'à un bassin circulaire avec réseau de drainage simple. Un bassin très allongé (fort coefficient de Gravelius) a en principe un temps de base plus long.

Même si le bassin, tout en gardant une grande longueur relative, présente une forme rectangulaire, on peut trouver deux réseaux hydrographiques successifs qui donnent les mêmes résultats qu'un bassin double. A l'opposé, on trouve un réseau hydrographique radial conduisant à des temps de base plus courts et à des coefficients de pointe plus forts ; entre les deux on trouve les réseaux en arête de poisson et le réseau dendritique très ramifié qui, si la forme du bassin n'est pas trop allongée, donne les formes d'hydrogramme les plus classiques. Il y a aussi le cas de deux tributaires dont l'un présente des apports nettement décalés par rapport à l'autre d'où une pointe plus molle (cas du bassin de Pô en MAURITANIE). Bien entendu si à tout ceci se superpose une grande hétérogénéité des sols des bassins, tout ce schéma peut se trouver perturbé. Sur un bassin avec une partie perméable à l'amont le peu de ruissellement superficiel est mal perceptible et on trouve des coefficients de pointe trop forts (cas de Polaka au BURKINA) ; il y a même souvent intérêt dans ce cas à négliger le bassin amont (cas des bassins de la Maggia au NIGER) ; une rupture de pente, surtout si elle est marquée par un marais ou un étang allonge le temps de base.

La rugosité de certains bassins (Kolel au BURKINA) allonge le temps de base, sans nécessairement réduire le coefficient de pointe.

L'infiltrabilité du sol joue également un rôle. La présence très rare maintenant d'un cordon plus ou moins large d'arbres et de broussailles au bord du lit et dans le lit donne à l'hydrogramme une forme plus molle. Enfin l'influence de l'homme, qu'il s'agisse de zone de culture d'étendue significative, de réseau de drainage, de la construction d'une piste en travers du bassin ou à plus

forte raison d'un barrage (il n'est pas question ici de zone urbanisée) est de nature à modifier sérieusement la forme de l'hydrogramme.

Tout ce qui précède montre la nécessité absolue de consulter le questionnaire en annexe avant d'entreprendre le calcul des éléments de l'hydrogramme. Même pour la simple prise en compte de la pente on a déjà dû tenir compte de l'influence éventuelle des pentes transversales en considérant $I_{g_{cor}}$ au lieu de I_g . (voir § 6).

7.2 Hydrogrammes unitaires instantanés :

Comme les coefficients de ruissellement, ils ont été revus pour les mêmes bassins et les résultats ont été publiés dans le même cahier de l'ORSTOM (RODIER, 1986). Les courbes de variation des temps de montée T_m et de base T_b ont été tracées en fonction de la superficie et de l'indice de pente globale corrigé $I_{g_{cor}}$. Ces courbes ont été ajustées sur une expression correspondant à peu près aux données physiques à la base de ces deux caractéristiques de l'hydrogramme

$$T_m \text{ ou } T_b = a(S - S_0)^n + b \quad \text{avec } n \leq 0,5$$

Le premier terme correspondant au ruissellement dans le réseau hydrographique et le second au ruissellement superficiel avant l'arrivée au premier ruisseau d'ordre 1.

On aboutit ainsi aux régressions suivantes : (S en Km^2)

Pour le temps de montée T_m en minutes

$I_g = 60$	(R6)	$T_m = 3,02 \cdot \sqrt{S-0,1} + 4,5$
$I_g = 25$	(R5)	$T_m = 6,64 \cdot \sqrt{S-0,1} + 9$
$I_g = 15$	(R4)	$T_m = 9,49 \cdot \sqrt{S-0,2} + 16$
$I_g = 7$	(R3)	$T_m = 20 \cdot \sqrt{S-0,3} + 23$
$I_g = 3$	(R2)	$T_m = 71 \cdot \sqrt{S-0,5} + 75$

Pour le temps de base T_b en minutes

$I_g = 60$	(R6)	$T_b = 15,5$	$\sqrt{S-0,05} + 16$
$I_g = 25$	(R5)	$T_b = 28$	$(S-0,1)^{0,45} + 30$
$I_g = 15$	(R4)	$T_b = 35,3$	$(S-0,15)^{0,45} + 50$
$I_g = 10$	(R3 - R4)	$T_b = 58,85$	$(S-0,2)^{0,45} + 80$
$I_g = 7$	(R3)	$T_b = 98,1$	$(S-0,3)^{0,45} + 120$
$I_g = 3$	(R2)	$T_b = 215$	$(S-0,5)^{0,45} + 300$

Il aurait été satisfaisant pour l'esprit de procéder à un certain lissage en assurant pour les coefficients a et b des variations très régulières ; étant donnés les éléments d'incertitude sur la détermination de T_m et T_b cela nous a paru inutile.

Ces courbes correspondent à des conditions moyennes pour les facteurs non pris en compte (voir 7.1.).

Le coefficient de pointe α est le rapport du débit maximum de ruissellement Q_{maxr} au débit moyen Q_r pendant le temps de ruissellement (ou temps de base). En général α s'écarte peu de 2,5 sauf pour un certain nombre de cas où l'écart s'explique parfaitement. Cette valeur de α n'est pas une valeur prudente mais plutôt une valeur médiane. Dans la pratique on résout le problème des écarts à cette valeur médiane en consultant préalablement le questionnaire. L'hydrogramme obtenu, appelé hydrogramme instantané, correspond à un corps d'averse qui ruisselle pendant une durée inférieure à la moitié du temps de montée. Tout le monde reconnaît et on le vérifiera plus loin qu'avec cette durée l'hydrogramme est pratiquement le même que pour une durée infiniment faible.

Pour des durées plus longues l'hydrogramme dépend de la durée de la pluie et de ses intensités successives. Il convient de découper l'averse en tranches de durée inférieure à la moitié du temps de montée, de déterminer pour chaque tranche la lame ruisselée et l'hydrogramme unitaire en résultant, et de faire la somme de ces hydrogrammes avec des décalages correspondant au pas de temps choisi pour la durée des tranches. Ceci suppose une bonne connaissance des variations d'intensité de l'averse.

7.3. Données pluviographiques de base :

Les données nécessaires sont les suivantes :

- rapport entre la hauteur totale correspondant au corps de l'averse (partie à forte intensité) et la hauteur de pluie journalière décennale (qui peut comprendre plusieurs averses),
- durée de ce corps en fonction de sa hauteur,
- position médiane du maximum d'intensité et intensité correspondant à ce maximum,
- forme générale de l'averse pour différentes durées du corps.

Pendant longtemps on a utilisé les données fournies par BRUNET-MORET qui ne donnaient que des indications assez sommaires sur certains de ces points. Depuis, les études de LE BARBE (1982) pour Ouagadougou et BOUVIER (1985) pour Niamey, ont fourni tous ces éléments mais Ouagadougou est à la limite du SAHEL et il est un peu inquiétant de partir d'un seul poste Niamey avec une pluie journalière décennale de 93 mm pour extrapoler les formes d'averses correspondant à une pluie journalière de 70 mm seulement. C'est pourquoi nous avons complété cette étude par celle du poste de Jalafanka (Mare d'Oursi - Burkina) observé pratiquement pendant six saisons des pluies. Cette station n'étant utilisée que pour obtenir des indications de tendance. Quelques averses importantes n'ont pas été enregistrées mais ont été observées à des pluviomètres très voisins ; on en a reconstitué le hyétogramme car sans ce complément les résultats risquaient d'être faussés.

Les résultats de ces trois sites sont cohérents ce qui permet de les utiliser directement ou avec extrapolation ou interpolation.

Pour des pluies journalières de 100 et 70 mm, on a déterminé les hyétogrammes correspondant aux averses principales. De plus, on a complété l'étude par la détermination des hyétogrammes contenant des tranches décennales de 15 et 30 minutes pour des régimes pluviométriques correspondant à ces pluies journalières de 100 et 70 mm.

Avant de donner les caractéristiques de ces hyétogrammes on fera les remarques suivantes :

- Le corps de l'averse est limité à toutes les tranches d'intensité pratiquement consécutives supérieures à 5 mm/h (pas d'intensité inférieure à 5 mm/h pendant plus de 15 mn) ; cela se justifie parfaitement pour l'hydrologie urbaine mais la limite physique du corps est une discontinuité bien nette en général entre tranches de fortes et de faibles intensités (traîne) et cette rupture correspondrait mieux à 10 ou 12 mm/h (peut-être un peu plus). Il en résulte que toutes les caractéristiques du corps et ses variations dans les deux études de Ouagadougou et de Niamey sont moins nettes que s'il s'agissait du véritable corps ; de plus la traîne est coupée en deux pour de nombreuses averses. Mais cette séparation à 5 mm/h est intéressante pour les très petits bassins imperméables qui peuvent ruisseler jusqu'à des intensités de 2 à 3 mm/h en fin d'averse.
- Il y a une différence de l'ordre de 20 % entre hauteur de pluie journalière décennale et hauteur décennale du corps. La hauteur décennale du corps devrait être considérée dans une journée ou la hauteur a été inférieure à la hauteur journalière décennale pour conserver à l'événement une récurrence décennale ; mais la différence est très minime et n'explique pas une partie significative de ces 20 %.

Dans ce qui suit, on admettra que le corps d'averse décennale se produit au cours d'une journée de hauteur de pluie décennale (on ne pourrait le faire pour une tranche d'averse de durée plus courte : 15 ou 30 minutes par exemple). La traîne d'intensité inférieure à 5 mm/h ne suffit pas non plus à expliquer cette différence. La raison principale est la suivante : les corps des averses sont calculés pour une averse très strictement définie, alors que, avec les mêmes définitions, la plupart des journées à très forte hauteur de précipitation présentent plusieurs averses et une traîne importante. On admettra pour l'averse décennale : des précipitations préliminaires séparées de l'averse principale avec son corps décennal, une traîne importante et une seconde averse beaucoup moins forte dont le ruissellement même en terrain imperméable ne joue pas directement sur le maximum.

La différence entre hauteur journalière et hauteur du corps indiquée ici de 80 % environ au lieu de 75 % indiquée par RODIER (1986) provient essentiellement du choix de l'intensité limite inférieure (5 mm/h au lieu de 12 mm/h).

Pour un certain nombre de caractéristiques les auteurs des rapports de Ouagadougou et de Niamey ont parfois considéré les valeurs moyennes et non les médianes ou les modes et ceci pour des distributions asymétriques et de petits échantillons. De plus la courbe des durées des corps en fonction des hauteurs avait été extrapolée en admettant une variation linéaire de la durée au-delà de 50-60 mm. Certaines valeurs trop fortes ont donc été corrigées. Pour Ouagadougou la correction est négligeable sauf pour des corps de plus de 70 mm. Pour Niamey elle est un peu plus importante. Après correction les trois courbes de durée du corps (y compris celle de Jalafanka) sont très voisines ce qui est très réconfortant. Dans ce qui suit on considère comme pour Kr une averse ponctuelle de 100 mm. et une averse ponctuelle de 70 mm.

7.4. Hauteur du corps, durée du corps, hyétoqramme :

7.4.1. Hauteur du corps :

Il convient de rapporter les hauteurs d'averses et de corps d'averses décennales à la hauteur journalière décennale correspondante. Il serait souhaitable que ces données soient calculées pour une même période. Pour Niamey : le corps d'averse décennale est de 73.3 mm, la hauteur de pluie journalière décennale de 92,8 mm. Le rapport entre hauteur du corps et de la pluie journalière est de 0,79. Pour Ouagadougou c'est plus délicat : la hauteur du corps décennal est de 83,2 mm, le rapport ne donne pas la hauteur de pluie journalière décennale ; calculée par le CIEH sur une période qui comprend la sécheresse comme la période de LE BARBE elle est égale à 103 mm. Le rapport entre hauteur du corps et pluie journalière est égal à 80 % (exactement 80,7).

La différence n'est pas significative d'autant plus que la valeur 103 mm n'est pas sûre à 3 ou 4 % près ; on ne peut pas en déduire une décroissance de ce rapport vers les zones plus arides.

Pour la pluie ponctuelle de 100 mm correspondant à une situation très voisine de Ouagadougou on adoptera un rapport de 80,7 %.

Pour la pluie ponctuelle décennale de 70 mm la différence avec Niamey est un peu trop élevée. Cette valeur de 70 mm correspond même à un climat un peu plus sec que celui de la Mare d'Oursi où pour une période de longue durée moins marquée par la sécheresse que la période d'observation nous avons admis que la pluie journalière décennale était de 75 mm. A Jalafanka (Oursi) pour les six averses les plus fortes pour lesquelles on dispose des enregistrements complets des pluviographes, le rapport varie entre 79 % et 100 % de la hauteur journalière. La valeur médiane serait de l'ordre de 90 %. Compte tenu du très faible échantillon et des valeurs observées à Niamey on a admis 84 % pour la valeur du rapport correspondant à la pluie journalière décennale 70 mm, ce qui conduit à un corps de 58,8 mm.

On rappelle que ce serait plutôt le corps décennal d'averse que la hauteur journalière décennale qui correspondrait à la crue décennale. En fait ce corps décennal devrait être compris dans une pluie journalière légèrement inférieure à la pluie journalière décennale mais la différence doit être négligeable. Les hauteurs des corps d'averses limitées à 5 mm/h seraient donc respectivement de 80,7 mm et de 58,8 mm pour les pluies décennales ponctuelles de 100 et de 70 mm.

Il sera intéressant pour les plus petits bassins à forte pente de calculer les pointes de crue correspondant à des tranches d'intensité décennale de 15' et de 30' plus en rapport avec les temps de concentration correspondants.

Pour les régions correspondant à Pj décennale 100 mm on part des données de Ouagadougou ; on trouve respectivement pour les tranches de 15' et de 30' décennales : 39,4 et 56,7 mm qui ramenées à Pj décennale 100 mm (en imposant une variation linéaire admissible pour un aussi faible écart) correspondent à 38,3 et 55 mm. On ne peut admettre que ces tranches d'intensité soient isolées, ce qui correspondrait à une fréquence inférieure à la fréquence décennale. On ne peut pas non plus admettre qu'elles soient incluses dans des averses et des corps eux-mêmes de fréquence décennale. Averses et corps correspondent à des diagrammes intermédiaires entre ces cas. Par tâtonnement on arrive pour les hauteurs du corps à des valeurs respectives de 61,7 mm (correspondant à une période de retour de 2 ans) pour la tranche de 15', de 73,6 (correspondant à une période de retour de 5 ans pour la tranche de 30 minutes).

Les averses journalières correspondantes seraient respectivement de 75,3 mm et de 91,3 mm (au lieu de 100 mm). Les intensités maximales en 5' sont admises égales à 189 et 160 mm/h, plus élevées que dans la note LE BARBE.

Pour les régions correspondant à P_j décennale 70 mm c'est plus délicat : A Niamey les tranches décennales de 15' et 30' atteignent respectivement 35,4 mm et 53,3 mm avec des corps de 53,7 et 65 mm. (même période de retour qu'à Ouagadougou).

A Jalafanka les mêmes tranches décennales seraient de 30 mm et de 45 mm, (P_j décennale 75 mm). Pour une hauteur journalière décennale de 70 mm ces mêmes tranches seraient de 28 mm et 42 mm. Le calcul par relation linéaire à partir de Niamey, ce qui est risqué conduit à 26,7 mm et 40,2 mm.

On adoptera en définitive 28 mm et 43 mm (valeurs de Jalafanka).

En ce qui concerne les hauteurs des corps contenant ces tranches de 15' et 30' on reprend les mêmes périodes de retour qu'à Ouagadougou et en multipliant les hauteurs de corps trouvées pour Niamey par le rapport (ce qui est risqué) des pluies journalières décennales 70/92,8, on arrive à 40,5 et 49 mm. Si on prend les rapports entre hauteur de tranches de 15' et 30' et hauteur du corps correspondant soit 0,621 et 0,736 on trouverait pour les mêmes hauteurs de corps à partir des hauteurs de tranches plus haut 45,1 et 56 mm.

On admettra en définitive les hauteurs de corps 41 mm et 55 mm.

Les intensités maximales en 5' dans ces deux tranches ont été admises respectivement égales à 154,4 mm/h et 114 mm/h.

Tous ces chiffres correspondant à des valeurs ponctuelles sont conservés tels quels pour les surfaces de bassins versants voisins de 1. Ils sont multipliés par 0,9 et 0,85 pour des bassins de 5 km² et 10 km² correspondant aux coefficients d'abattement des diagrammes de G. VUILLAUME (1974).

7.4.2 Durée du corps :

Il paraît prudent de reconsidérer les courbes donnant la durée du corps en fonction de sa hauteur. Dans l'article précité de LE BARBE sur Ouagadougou le tracé de cette courbe s'appuie, pour une hauteur de corps 85-105 mm, sur la valeur médiane de la durée qui est fortement influencée par un corps de 240'. Cela conduit à une fin de courbe linéaire peu vraisemblable. En

adoptant un tracé qui suit de près les valeurs trouvées pour les autres hauteurs de corps (intervalles 25-45 mm, et 65-85 mm), on arrive à une courbe corrigée qui nous paraît plus plausible. La correction est faible : pour une hauteur de corps de 80 mm la durée passe de 79' à 75', correction que nous négligerons.

Dans l'étude de BOUVIER sur Niamey, la courbe est construite à partir des moyennes et non des médianes. La différence est surtout sensible pour les faibles hauteurs de corps (45-65 mm) et nous avons préféré adopter une courbe corrigée.

Pour Jalafanka les valeurs médianes pour les intervalles 15-25 mm, et 25-35 mm correspondent à des échantillons à peu près suffisants ; pour 35-45 mm et 45-50 mm ces échantillons sont insuffisants et les valeurs obtenues sont peu fiables. On trouverait pour les quatre intervalles de hauteur les durées de corps suivantes :

Hauteur du corps	40 mm	60 mm	80 mm
OUAGADOUGOU	51'	64'	79'
NIAMEY	60'	79'	98'
OUAGADOUGOU corrigé	54'	64'	75'
NIAMEY corrigé	59'	72'	84'
JALAFANKA	58'		

Les trois courbes sont assez voisines avec cependant des durées un peu plus longues pour les zones les plus arides.

En définitive on a adopté les valeurs suivantes pour les sites correspondant aux pluies de 24 h décennales égales à 100 mm et à 70 mm.

	Pluie décennale ponctuelle 100 mm			Pluie décennale ponctuelle 70 mm.		
	1	5	10	1	5	10
Superficie (km ²)						
Hauteur du corps	80,7	72,6	69,4	58,8	52,9	50 mm
Duree du corps	80'	75'	72,5'	70'	65'	65'

On notera que ces durées sont données autant que possible en multiple de 5', pas de temps adopté pour les formes de hyétogramme dont il sera question plus loin.

En ce qui concerne les averses correspondant aux tranches décennales de 15' et 30' on prendra les durées du corps d'après la courbe de Ouagadougou et la courbe de Niamey corrigée ; ceci est un peu contestable pour la tranche de 15', l'averse contenant cette tranche est particulière par rapport à toutes les averses présentant la même hauteur de corps et la durée de celui-ci dans ce cas spécial, peut-être plus courte que la valeur médiane.

7.4.3. Forme du hyétogramme :

Dans le cas des sites à pluie décennale de 100 mm on peut s'inspirer directement des formes types données par LE BARBE (1982). Mais il n'y a pas eu de lissage d'une forme type à une autre et certaines singularités correspondent manifestement à une particularité de l'échantillon d'averses choisies pour tracer une forme type donnée. C'est ainsi que la forme type pour une averse de durée comprise entre 80 et 90 mn présente une première tranche d'intensité de 5' à intensité trop forte ce qui ne serait pas sans conséquence sur la forme de l'hydrogramme correspondant. Pour les corps de 80' on a dû réduire nettement cette intensité en compensant par des majorations sur d'autres tranches, (pas celle du maximum ce qui aurait trop d'influence sur le débit maximum de l'hydrogramme). Le hyétogramme type étant construit pour une durée de 85', il faut réduire cette durée à 80' sans modifier la forme. Enfin il faut respecter la position de la tranche de l'intensité maximale liée à la durée du corps, pour des durées de 75 et 72,5, quand on passera de l'averse ponctuelle à des averses couvrant 5 et 10 km². Les diagrammes s'inspireront alors du premier diagramme car lorsque la surface augmente le diagramme de la pluie moyenne (dans la mesure où on peut en affecter un) doit garder un "air de famille" avec les diagrammes de pluie ponctuelle. Pour les superficies voisines de 1 km² on admet que la pluie moyenne est égale à la pluie ponctuelle. Tout ceci explique pourquoi le hyétogramme choisi pour le corps de 80,7 mm correspondant à une pluie journalière de 100 mm. s'écarte légèrement de la forme type donnée par LE BARBE pour un corps d'averse de 80 à 90 mm. Pour les sites à pluie décennale de 70 mm le même problème abordé en 7.4.1. et 7.4.2. se présente : le site de Niamey-aérodrome est nettement moins aride et les données de Jalafanka, si sommaires soient-elles, sont presque mieux appropriées à l'étude des pluies de 70 mm. On a cependant cherché à établir une forme type à partir de celles données par BOUVIER (1985) pour les corps d'averse de 55-60 et 80-90 mm. Malheureusement pour les corps d'averse de 55-60 mm le diagramme moyen est assez fortement affecté par des averses à pointes doubles ce qui amollit la forme de l'hydrogramme et diminue le coefficient de pointe ; le même inconvénient, beaucoup plus atténué, se retrouve pour le corps d'averse de 80-90 mm. Nous avons donc abandonné et nous avons déterminé l'intensité maximale en 5' de l'averse d'après les données de la Mare d'Oursi (Jalafanka) et reconstitué tant bien que mal un hyétogramme en s'inspirant des formes types de BOUVIER pour des durées de 40-45' et de 80-90'.

A Jalafanka pour des corps d'averse de 25 à 35 mm, l'intensité maximale (I_{max}) en 5 minutes vaut 77 mm/h et pour un corps d'averse de 44 mm la valeur médiane de I_{max} est de 89,4 mm/h. En admettant pour extrapoler une variation linéaire jusqu'à un corps d'averse de 58,8 mm on aboutit à une valeur de I_{max} de 102,5 mm/h. On a admis 105 mm/h. Notons qu'avec les courbes de BOUVIER on arrivait à des valeurs voisines de 90 mm/h. Comme pour les sites à pluies décennales de 100 mm, les hyétoigrammes moyens pour des superficies de 5 et 10 km² sont obtenus en multipliant les intensités des différentes tranches par le coefficient d'abattement.

Etudions maintenant les corps d'averses contenant des tranches décennales de 15 et 30 minutes pour des sites correspondant à des pluies décennales journalières de 70 et 100 mm. On détermine l'intensité maximale de telle façon que le diagramme pour les tranches de 15' et 30' conserve l'allure qu'il a pour des corps de courte durée, et cette intensité doit rester inférieure à l'intensité maximale décennale en 5 minutes.

On connaît les hauteurs de corps et les durées. Tout ceci laisse beaucoup moins de liberté qu'on pourrait le croire pour la mise au point des hyétoigrammes bien que toutes nos manipulations pourraient sembler assez arbitraires à première vue. Si un certain nombre de précautions sont prises pour respecter l'intensité de la tranche d'intensité maximale, sa position dans le temps, la durée du corps, le degré de croissance des premières tranches d'intensité et les faibles intensités de la fin du corps, toute modification sensible mais non importante du hyétoigramme entraîne pour l'hydrogramme des écarts bien inférieurs à 5 %.

Pour les pluies ponctuelles ou les pluies moyennes sur 1 km² environ les hyétoigrammes correspondant à un corps d'averse décennale de 80,7 mm et de 58,8 mm sont représentés par les figures 3 et 4 et par le tableau III.

Seule la partie de la traîne ruisselant sur un terrain qualifié d'imperméable est appréciée de façon très grossière ; le seul but de cette "estimation" est de montrer qualitativement son influence sur le coefficient de pointe. L'averse secondaire n'est pas précisée mais on donne une idée de l'importance de son ruissellement dans le tracé des hydrogrammes. On trouvera ci-après le tableau IV précisant les intensités successives pour des tranches de 15' et 30' décennales (tranches de 5'). Ces hyétoigrammes sont représentés sur les figures 5a et 5b.

Fig.3

Hyetogramme type du corps de l'averse principale

Pluie journalière décennale 100mm

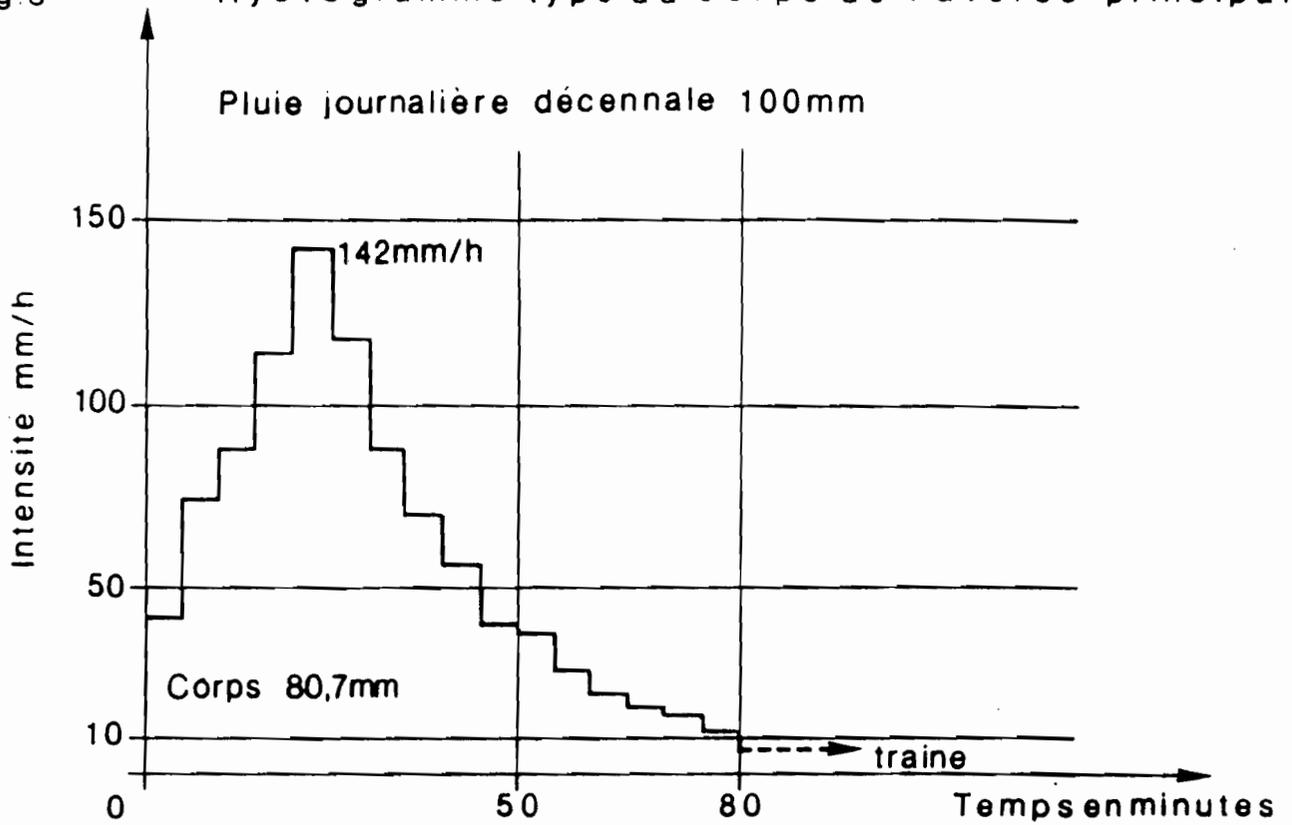


Fig.4

Hyetogramme type du corps de l'averse principale

Pluie journalière décennale 70mm

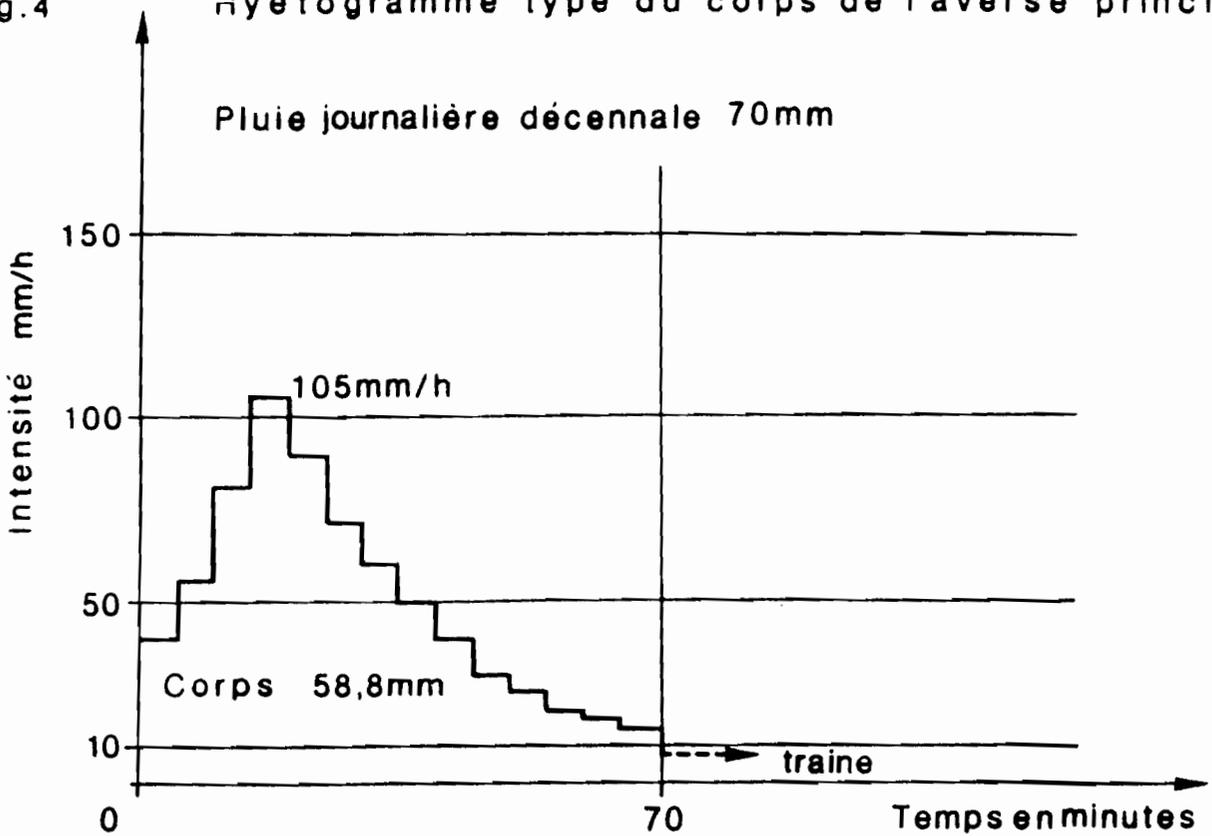


TABLEAU III

HYETOGRAMMES TYPES POUR DES PLUIES JOURNALIERES DECENNALES 100 ET 70 MM
EN TRANCHE DE 5 MINUTES

	Pluie journalière décennale 100 mm (corps décennal 80,7 mm)			Pluie journalière décennale 70 mm (corps décennal 58,8 mm)	
	Intensité mm/h	Hauteur mm		Intensité mm/h	Hauteur mm.
1° tranche	41,75	3,47	1° tranche	41	3,42
2° tranche	75	6,26	2° tranche	56	4,67
3° tranche	88	7,34	3° tranche	82	6,83
4° tranche	115	9,58	4° tranche	105	8,75
5° tranche	142	11,83	5° tranche	90	7,50
6° tranche	117	9,75	6° tranche	73	6,08
7° tranche	88	7,33	7° tranche	61	5,08
8° tranche	70	5,83	8° tranche	50	4,17
9° tranche	56	4,67	9° tranche	40	3,33
10° tranche	40	3,33	10° tranche	30	2,50
11° tranche	37	3,08	11° tranche	25	2,08
12° tranche	28	2,33	12° tranche	20	1,67
13° tranche	23	1,92	13° tranche	18	1,50
14° tranche	19	1,58	14° tranche	15	1,25
15° tranche	17	1,42			
16° tranche	12	1,00			
TOTAL		80,72			58,83
Traîne (1) partielle	5 mm (1h)	5 mm	Traîne (1) partielle	5 mm (33')	2,75
Averse préliminaire		1 mm	Averse préliminaire		1 mm
Averse secondaire			Averse secondaire		

(1) intensités supérieures à 2 mm/h.

Fig.5a Site à pluie journalière décennale 100mm

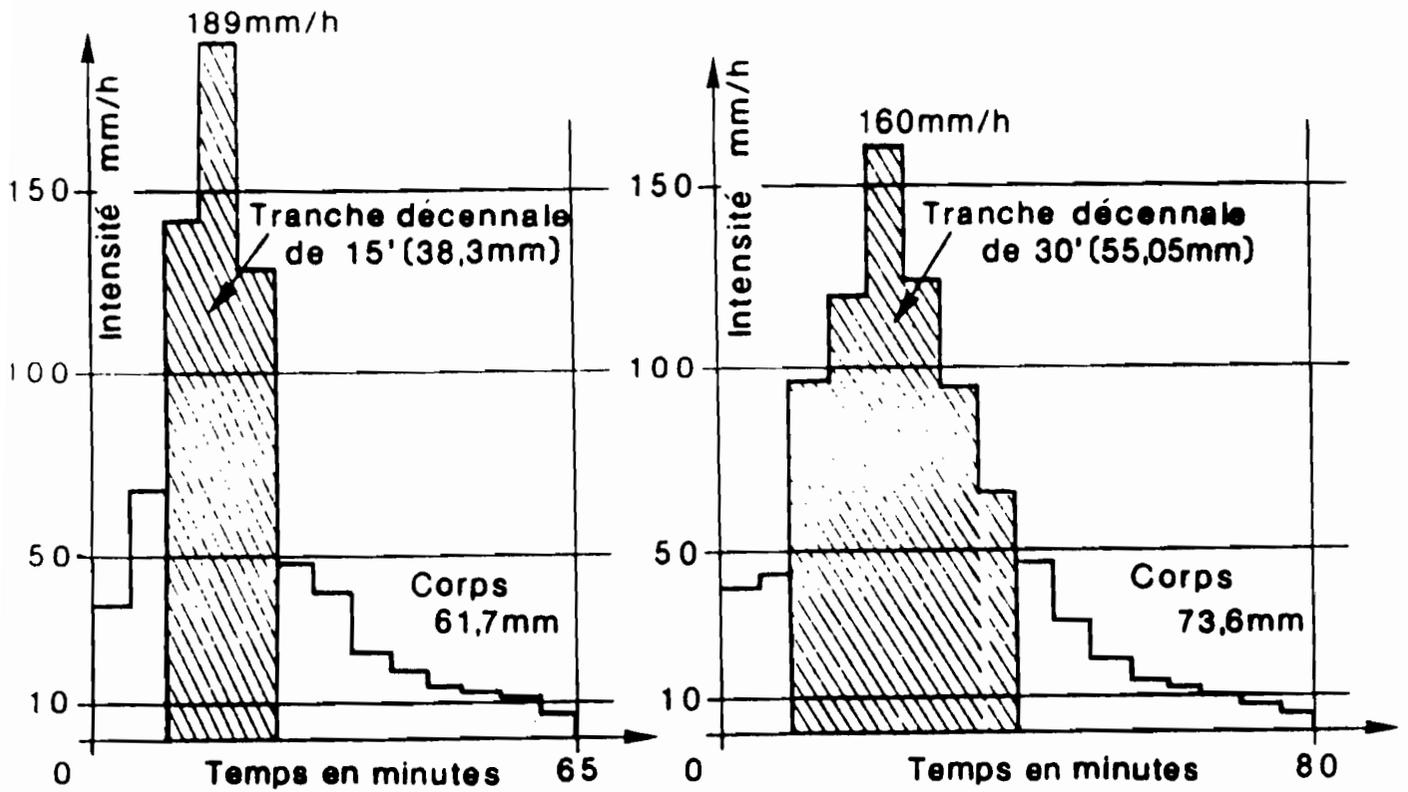


Fig.5b Site à pluie journalière décennale 70mm

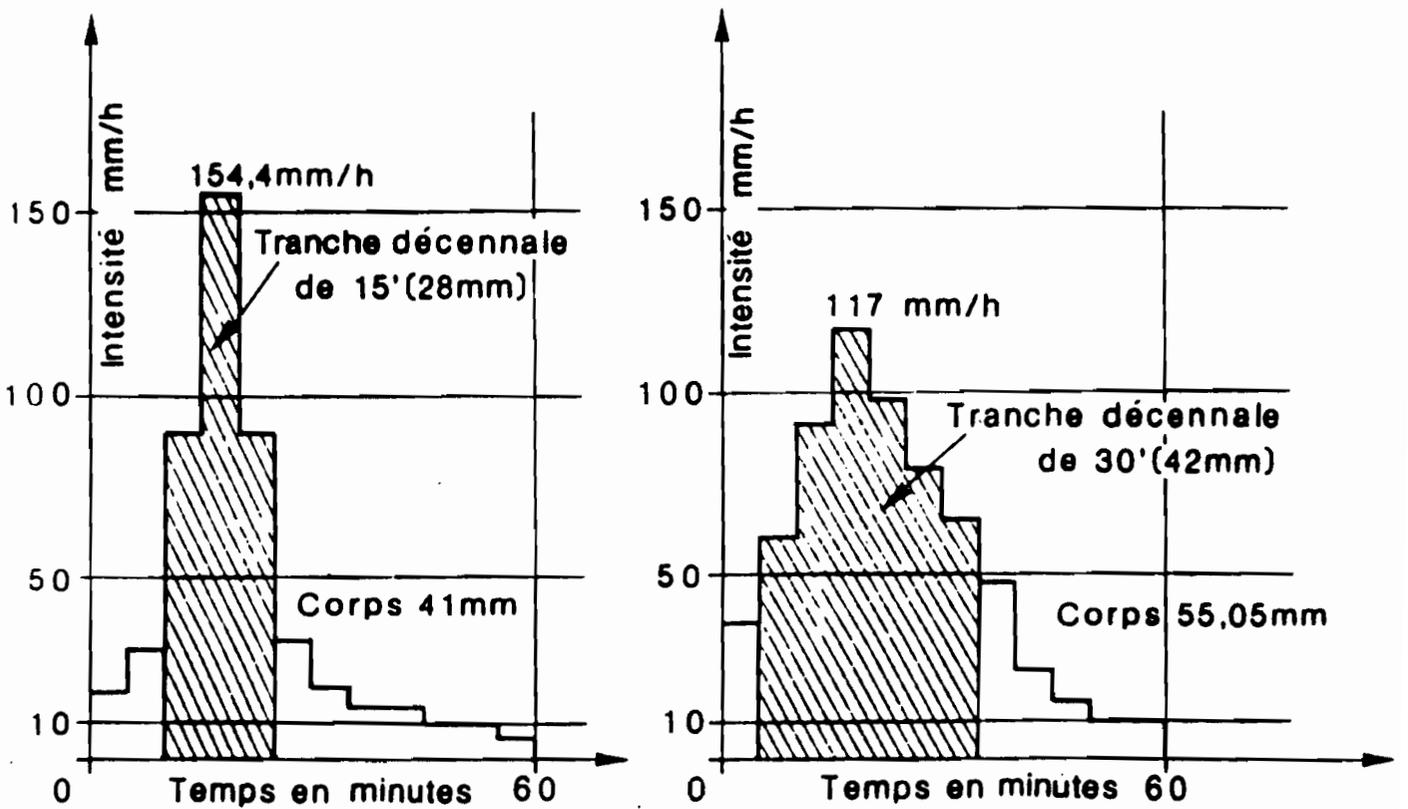


TABLEAU IV

HYETOGRAMMES TYPES D'AVERSES CONTENANT DES TRANCHES DE 15 ET 30 MINUTES
DECENNALES POUR DES SITES A PLUIES JOURNALIERES DECENNALES 100 ET 70 MM
(TRANCHES DE 5 MINUTES)

Site à pluie journalière décennale 100mm. Site à pluie journalière décennale 70mm.

	Tranche décennale 15' (38,3mm) corps 61,7mm	Tranche décennale 30' (55,05mm) corps 73,6mm		Tranche décennale 15' (28mm) corps 41mm	Tranche décennale 30' (42mm) corps 55,03mm
1° tranche	36,5	41	1° tranche	18	37
2° tranche	67,9	43	2° tranche	30	61,4
3° tranche	142,2	96,3	3° tranche	90,6	92
4° tranche	189	120	4° tranche	154,4	117
5° tranche	128	160	5° tranche	90,6	99,3
6° tranche	47,7	124	6° tranche	32	80
7° tranche	40	94,1	7° tranche	20	66,5
8° tranche	22,9	66,2	8° tranche	15	48
9° tranche	19,1	47	9° tranche	15	24
10° tranche	15,05	30	10° tranche	10	15
11° tranche	13,3	19	11° tranche	10	10
12° tranche	12,4	14	12° tranche	7	10
13° tranche	6,6	12			
14° tranche	0	10			
15° tranche	0	7			
16° tranche	0	5			

Malgré un certain nombre d'hypothèses un peu hasardeuses on est tenu à une certaine rigueur dans les calculs afin de ne pas fausser les variations des paramètres à étudier suivant les différentes conditions de ruissellement ; cela explique un nombre de décimales qui à première vue choqueront probablement le lecteur.

7.5 Etude des caractéristiques de forme de l'hydrogramme

7.5.1. Principes

Pour les très petits bassins versants, l'averse décennale n'étant pas unitaire, la forme de l'hydrogramme qui en résulte dépend non seulement des caractéristiques du bassin mais du diagramme de variation dans le temps de l'intensité de la partie de la pluie qui ruisselle. Pour adapter à des hydrogrammes composés les courbes donnant les temps de montée et de base telles qu'elles ont été précisées par RODIER (1986) et pour donner des indications sur les valeurs du coefficient de pointe α , il faudra considérer non seulement la superficie et l'indice de pente corrigé du bassin, mais encore, la hauteur de pluie décennale, représentant à peu près les variations climatiques du Nord au Sud du Sahel (plus les influences particulières au site) et les caractéristiques d'infiltrabilité du bassin. Il serait bon de ne pas avoir à prendre en compte les caractéristiques "secondaires" (elles ne le sont pas toujours) du bassin telles que : la nature du réseau hydrographique, l'allongement du bassin, la couverture végétale, etc.

Les calculs doivent donc s'inspirer d'une approche comportant bon nombre de simplifications. On pourra négliger l'influence de la couverture végétale en conservant en première approximation l'hypothèse que l'averse décennale a lieu vers le début de la saison des pluies. Pour tenir compte des variations climatiques on ne considèrera comme pour l'étude de Kr que deux cas : celui où la pluie décennale ponctuelle journalière est de 100 mm, et celui où elle est de 70 mm.

Pour éliminer l'effet des facteurs "secondaires" on choisira un certain nombre de bassins fictifs d'indices de pente, d'infiltrabilité et de superficies tels, que tout le champ de variation soit couvert. Cette approche présente l'inconvénient suivant : l'hydrogramme risque d'être faussé par les opérations effectuées pour aboutir aux courbes donnant les coefficients de ruissellement et les temps de base (voir § 6 et 7.2). Mais les erreurs que l'on peut faire en utilisant les résultats de bassins observés risquent d'être beaucoup plus fortes, l'influence des facteurs "secondaires" restant mal connues sur le plan quantitatif. En outre, une bonne partie du champ de variation resterait inexplorée ; on peut citer par exemple le cas des bassins perméables.

On considèrera donc pour chaque type de site à pluie journalière décennale ponctuelle de 100 mm et de 70 mm une série de bassins imperméables (P_2), relativement imperméables (P_3) et perméables (P_4) pour des superficies voisines de 1 km², égales à 5 km² et 10 km² et pour des indices de pente globaux corrigés, $I_{g\text{cor}}$ de 60, 25, 15 et 7 m.km⁻¹ (voir § 6).

Dans la mesure du possible, le champ de variation des divers paramètres doit être étudié de façon exhaustive afin de déceler si dans certains cas on ne rencontrerait pas de très fortes valeurs du coefficient de pointe α comme cela avait été le cas dans les études anciennes.

Nous n'avons pas considéré le cas de terrains très perméables (P_5) comme celui de Bao-Trésor à Niamey, ou d'un autre bassin représentatif au Nord de l'estuaire de la Casamance. Ce qu'on a pu identifier comme du ruissellement provient pour le premier bassin de la faible superficie des toitures et de l'unique rue goudronnée et pour le second d'un village avec ses surfaces de terre battue au voisinage de la station de jaugeage. La très forte perméabilité du sol s'explique par une combinaison de sols perméables et de couverture végétale non négligeable (mais on trouve parfois aussi le cas d'amoncellement de blocs avec interstices comblés de matériaux perméables). Les caractéristiques de forme de l'hydrogramme qu'on pourrait déduire de tels bassins seraient tout à fait illusoire et les débits de crues décennaux très faibles. Le cas de bassins très imperméables (P_1) qui n'existe pas dans la nature n'a pas été étudié non plus, mais on sait qu'il existe des cas où l'infiltrabilité moyenne est un peu inférieure à celles des bassins dits imperméables (P_2) (par exemple, le bassin de Gountouré au Burkina-Faso).

Le cas de bassins avec indice de pente de 3 m/km (R_2) a été peu étudié car avec cette pente tous les bassins au-delà de 1 km² présentent des temps de montée assez longs pour que la crue décennale reste unitaire.

L'influence des facteurs secondaires a été évoquée dans le questionnaire et il est bien entendu que dans ce qui suit il s'agira pour ces facteurs de conditions moyennes. On a analysé de façon assez approfondie le cas des bassins imperméables et le problème du ruissellement de la traîne d'intensité inférieure à 5 mm/h. En effet c'est dans ce cas que l'on risque le plus de trouver des coefficients de pointe dépassant nettement 2,5 ; ceci permettra dans une certaine mesure de considérer des pluies décennales journalières avec plusieurs averses.

Enfin après l'étude des diagrammes d'intensité présentée en 7.4. il était facile de calculer ce que seraient les pointes de crues provoquées non plus par la pluie décennale journalière mais par des tranches d'intensité décennale de 15' et 30'. Ce type d'averse doit donner la véritable pointe de crue décennale pour des surfaces respectives de 1 km² et 5-10 km² mais alors le volume de crue est nettement inférieur au volume décennal ; on comparera ces débits de pointe décennaux avec ceux correspondant à la pluie décennale journalière.

7.5.2 Etude préliminaire

Une première étude a été faite avec pour objet principal la détermination de la surface de bassin au-delà de laquelle l'averse décennale était unitaire. En première approximation on a supposé des bassins relativement imperméables pour lesquels la durée du corps de l'averse efficace (portion qui ruisselle) est inférieure de 10 minutes à la durée du corps de l'averse.

On a étudié les cas des deux pluies décennales de 70 mm et de 100 mm pour des bassins avec pentes d'indices I_g corrigés égaux à 3, 7, 15, 25 et 60 m/km et pour des superficies croissantes. Pour cette étude sommaire on ne peut pas tenir compte de l'infiltrabilité. On ajoute, en effet, au temps de base de l'averse unitaire T_b , la durée du corps efficace après déduction de la moitié du temps de montée T_m et on obtient le temps de base T_b2 .

Les résultats sont les suivants pour les superficies proches de la superficie limite :

Pluie décennale de 100 mm			Pluie décennale de 70 mm		
$I_g = 3$	$S = 1 \text{ km}^2$	$T_{b1} = 440 \text{ mn}$ $T_{b2} = 448 \text{ mn}$	$S = 0,5 \text{ km}^2$	$T_{b1} = 300 \text{ mn}$ $T_{b2} = 312 \text{ mn}$	
$I_g = 7$	$S = 5 \text{ km}^2$	$T_{b1} = 316,5 \text{ mn}$ $T_{b2} = 347 \text{ mn}$	$S = 5 \text{ km}^2$	$T_{b1} = 316,5 \text{ mn}$ $T_{b2} = 342 \text{ mn}$	
$I_g = 15$	$S = 30 \text{ km}^2$	$T_{b1} = 213 \text{ mn}$ $T_{b2} = 235 \text{ mn}$	$S = 25 \text{ km}^2$	$T_{b1} = 200 \text{ mn}$ $T_{b2} = 219,5 \text{ mn}$	
$I_g = 25$	$S = 60 \text{ km}^2$	$T_{b1} = 209 \text{ mn}$ $T_{b2} = 232 \text{ mn}$	$S = 40 \text{ km}^2$	$T_{b1} = 177 \text{ mn}$ $T_{b2} = 203 \text{ mn}$	
$I_g = 60$	$S = 80 \text{ km}^2$	$T_{b1} = 155 \text{ mn}$ $T_{b2} = 191 \text{ mn}$	$S = 100 \text{ km}^2$	$T_{b1} = 180 \text{ mn}$ $T_{b2} = 194 \text{ mn}$	

Pour que l'averse décennale puisse être considérée comme unitaire il faut, en pratique que la différence entre T_{b1} et T_{b2} soit nettement inférieure à 10 % ce qui conduit aux surfaces suivantes :

- $I_g = 3$; S limite = 1 km^2 l'averse est toujours unitaire ;
- $I_g = 7$ on peut admettre une surface limite de $5-6 \text{ km}^2$;

$I_g = 15$ on peut admettre une surface limite de 30 km^2 ;

$I_g = 25$ la surface limite serait voisine de 70 km^2 ;

$I_g = 60$ il n'y a pratiquement pas de surface limite l'averse décennale n'est jamais unitaire puisqu'au-delà de 100 km^2 l'application de la méthodologie de l'hydrogramme unitaire devient hasardeuse.

Il convient de ne pas perdre de vue le fait que les formules donnant T_{b1} ne sont valables que jusque vers 20 km^2 , mais il est à peu près certain que la révision des bassins de superficie supérieure à 10 km^2 conduira aux mêmes résultats pour S supérieur à 20 km^2 . Par conséquent on devra considérer T_{b2} dans de nombreux cas.

Bien entendu on ne peut pas étudier le coefficient de pointe par des méthodes aussi simples. Il faut construire l'hydrogramme composé ce qui permettra de reprendre l'étude de T_{b2} de façon plus approfondie.

7.5.3. Méthodologie de calcul

Il est essentiel de procéder à des calculs simples en suivant des règles aussi précises que possible et autant que possible les mêmes pour tous les bassins fictifs. On a jugé utile de les préciser ci-après.

Pour la totalité des bassins on a admis une averse préliminaire, séparée de l'averse principale, qui réduit de 1 mm la pluie d'imbibition (partie de la pluie absorbée avant que ne commence le ruissellement superficiel). Après déduction de ce mm ., on a soustrait de la pluie le reste de la pluie d'imbibition qui peut absorber plusieurs tranches de 5 mn du hyétogramme. La pluie d'imbibition croît légèrement avec la surface (remplissage du lit) et beaucoup avec l'infiltrabilité. On s'est inspiré pour ses variations des valeurs calculées dans les rapports anciens, des données recueillies par CASENAVE au minisimulateur et des données de l'étude de CHEVALLIER et *al.* (1985) sur les bassins de la Mare d'Oursi. En outre, comme ceci a déjà été fait dans l'annexe de la note de RODIER (1986) on prend pour les quatre premières tranches de précipitation, y compris celles absorbées éventuellement par l'imbibition, une valeur du coefficient de ruissellement analogue à celles observées pour des précipitations de même hauteur sur des bassins versants de caractéristiques voisines.

Le coefficient de ruissellement global est donné par les diagrammes présentés au paragraphe 6 ; il est bien entendu que ces courbes ne donnent la valeur vraie qu'à 5% près. Cependant on a tenu à utiliser les chiffres des diagrammes originaux, le dessin des diagrammes ayant pu donner lieu à de très légères déformations systématiques, ce qui conduirait à des valeurs très légèrement différentes.

Pour les bassins imperméables, il est clair d'après les rapports anciens et, plus récemment pour la Mare d'Oursi, (bassins de Gountouré et de Jalafanka) que ces bassins ruissellent en fin de fortes averses pour des intensités égales ou même inférieures à 2 mm/h. Ceci nous a donné de fortes difficultés pour l'estimation du temps de base de l'hydrogramme instantané (Annexes de RODIER, 1986).

L'étude du ruissellement du corps ne suffit pas : il faut également considérer le ruissellement de la traîne pour des intensités inférieures à 5 mm/h et supérieures à 2 mm/h. On a représenté cette fin de traîne par une tranche fictive de 5 mm/h dont la durée correspond à celle du ruissellement. On a admis également une averse secondaire séparée de l'averse principale et qui produit un faible volume de ruissellement décroissant avec l'infiltrabilité et la superficie du bassin ; mais celui-ci est faible (moins de 4 mm) car on s'écarte nettement des cas de l'averse double à pointes égales. Tout ceci est très vague, mais s'inspire de ce qui a été observé sur les bassins. De plus, ce n'est pas la précision qui est importante, mais la mise en évidence de l'influence du ruissellement de traîne sur le temps de base (notation : T_{b2} : temps de base correspondant à la durée du corps et T_{b2t} : temps de base correspondant à l'ensemble corps et traîne). Seul T_{b2} sera connu des utilisateurs comme seule sera connue la lame d'eau globale correspondant à la pluie décennale de 24 h (elle comprend le ruissellement de la fin de traîne et celui de l'averse secondaire après l'averse principale). La combinaison des deux conduit à un coefficient de pointe qu'on appellera q_p seul connu des utilisateurs.

D'après ce qui précède on détermine les coefficients de ruissellement des tranches successives de 5 mn du hyétogramme, ce coefficient passant par un maximum après la pointe maximale d'intensité comme ceci a été observé pour les fortes averses sur les bassins représentatifs ; ce coefficient se maintient vers le maximum pendant plusieurs tranches de 5 mn, puis décroît progressivement.

Le maximum du coefficient de ruissellement des diverses tranches peut dépasser 100 %. C'est ce qu'on observe d'ailleurs pour les bassins de Gountouré et de Jalafanka et probablement sur un bon nombre d'autres. Le maximum atteint jusqu'à 115 %. Il se justifie par le fait que le rapport entre pluie au sol et pluie dans le pluviomètre Association peut être de l'ordre de 1,3.

Tout ce qui précède peut faire croire qu'il y a beaucoup d'arbitraire dans la détermination des coefficients de ruissellement de chaque tranche. En fait, on dispose de beaucoup moins de liberté pour le choix de ces coefficients qu'il n'apparaît à première vue et nous avons rencontré de sérieuses difficultés dans le cas des bassins "imperméables" voisins de 1 km² à indice de pente 60 m/km à tel point que le coefficient global de ruissellement de 84 % pour une pluie de 100 mm nous paraît légèrement surestimé.

Il faut alors passer aux hydrogrammes. Le corps d'averse est divisé en tranches d'averse de durée égale à la moitié du temps de montée. Comme ces tranches peuvent être supérieures ou inférieures à 5 mn, il est nécessaire de procéder à un nouveau découpage des tranches de ruissellement précédentes calculées pour 5 mn. On détermine les nouvelles lames d'eau, le temps de base et le temps de montée qui sont ceux de l'hydrogramme unitaire instantané et le maximum de débit ruisselé Q_{maxr} avec un coefficient de pointe égal à 2,5.

On ajoute alors les ordonnées de tous ces hydrogrammes pour diverses abscisses données au voisinage présumé du maximum de l'hydrogramme global et on détermine ce maximum.

On s'est efforcé de tracer les hydrogrammes des tranches avec des règles uniformes : la croissance des débits jusque vers le maximum est linéaire, la pointe est constituée par une forme arrondie de durée de 5 mn environ pour les hydrogrammes avec le plus fort débit maximum, au niveau du raccordement avec la droite de la montée. La hauteur de cet arrondi est égale à 0,03 fois environ la valeur du maximum.

Pour la décrue, elle commence par un segment de droite coupant l'axe des abscisses aux deux tiers de T_{b1} : c'est surtout ce détail qui assure un coefficient de pointe proche de 2,5. Cette droite se raccorde progressivement par une courbe qui est tangente à l'axe des abscisses pour les hydrogrammes les plus plats.

Enfin l'échelle des débits est telle que la hauteur du plus fort hydrogramme reste à peu près la même. On ne garantit pas par ce procédé d'aboutir à une forme d'hydrogramme absolument correcte mais on ne risque pas d'introduire de distorsion pouvant conduire dans certains cas, à des coefficients de pointe sous-estimés ou surestimés.

Notons que dans les cas de temps de montée très faibles conduisant à un très grand nombre de tranches (20 tranches dans le cas de bassin lg 60 Imperméable de 1,1 km²), il suffit de considérer les premiers hydrogrammes. Dans le cas cité ici les dix premiers suffisent largement. Pour des temps de montée longs avec seulement trois ou quatre tranches, il faut toutes les considérer. On donne un exemple de calcul au sous-paragraphe 7.5.4.

Le temps de base T_{b2} est déterminé en ajoutant au temps de base de l'hydrogramme unitaire la durée du corps qui ruisselle moins la moitié du temps de montée. Si pour des intensités inférieures à 5 mm/h la traîne ruisselle, on ajoute le temps de ruissellement de cette traîne ; on obtient ainsi un temps de base T_{b2t} .

Le coefficient de pointe α n'a qu'une valeur α_1 si la fin de traîne ne ruisselle pas. C'est le rapport du débit maximum ruisselé de l'hydrogramme global au débit moyen de ruissellement. Celui-ci est obtenu en divisant le volume ruisselé par le temps de base T_{b2} .

Si la fin de traîne ruisselle il y a trois coefficients de pointe. Le premier correspond au temps de base de l'hydrogramme global limité au ruissellement du corps, le volume ruisselé correspondant uniquement au ruissellement du corps. Le second α_2 correspond au temps de base total de l'hydrogramme global (sans le ruissellement secondaire après la traîne) et au volume ruisselé de l'averse principale.

Le troisième α_p est le coefficient de pointe tel qu'il est calculé par l'utilisateur : on ne fait pas intervenir dans le temps de base le ruissellement de la traîne de durée très mal connue et qui ne peut conduire qu'à des valeurs à forte dispersion mais on conserve le temps de base de ruissellement du corps T_{b2} . Le volume ruisselé correspond à la totalité du ruissellement (y compris le ruissellement de l'averse secondaire) tel qu'il résulte de l'utilisation des courbes de Kr_{100} mm ou Kr_{70} mm. Dans les trois cas le débit maximum Q_{maxr} est évidemment le même.

Comme on le voit par ce qui précède, la méthodologie de calcul des débits de crues décennales, qui sera reprise au sous-paragraphe 8.5.3. pour le cas des bassins représentatifs, combine dans une certaine mesure les deux approches anciennes pour déterminer la fonction de production : d'une part l'utilisation du concept de capacité globale d'infiltration ou mieux d'absorption qui englobe tout ce qui est à déduire de l'intensité de la pluie pour arriver au ruissellement et d'autre part celle, plus empirique du coefficient de ruissellement.

La première est utilisée avec l'emploi de la notion de pluie d'imbibition. Celle-ci est à peu près la même que celle observée sur les bassins pour un indice d'humidité antérieure IK dont la valeur serait comprise entre 2 et 5 (voir CHEVALLIER et *al.*, 1985).

Ce sont des conditions très proches de celles pour lesquelles dans les études de 1965 on avait choisi la valeur de la pluie limite pour caractériser la perméabilité globale des bassins. Cependant pour des bassins perméables, relativement imperméables et même pour certains bassins imperméables on a tenu compte du fait que les sols sont hétérogènes. Dans ces conditions une hauteur de pluie limite de ruissellement correspond aux parties les plus imperméables, alors que c'est la pluie d'imbibition moyenne pour les divers types de sols qu'il convient de considérer pour la mise en oeuvre de la fonction de production. Ceci nous a conduit à des valeurs de la pluie d'imbibition supérieures aux pluies limites observées sur les bassins.

Après avoir soustrait la pluie d'imbibition, nous avons opéré sur des lames de précipitation avec le plus petit pas de temps 5 mn que l'on puisse considérer, compte tenu des enregistrements pluviographiques. Pour ces lames précipitées, on utilise alors le concept du coefficient de ruissellement avec une fonction de variation dans le temps que nous n'avons pas jugé utile d'expliciter. De nombreux essais nous ont montré que des modifications importantes de cette fonction conduisaient en définitive à des différences de 1 % au maximum sur le débit maximum décennal. Nous n'avons pas cru utile de passer par la capacité d'absorption car elle est plus difficile à utiliser et son emploi pose le problème redoutable de l'estimation de la pluie au sol. Dans l'exemple de calcul présenté ci-après, un coefficient de 120 % (pluie au sol divisé par pluie au pluviomètre) donnerait une capacité d'absorption de 4,4 mm/h, alors qu'un coefficient de 130 % donnerait une capacité de 8,1 mm/h à la 12^e tranche pour une intensité au sol de 50 mm/h après 90 mm de pluie au sol. Il est en outre très difficile de rattacher cette capacité d'absorption globale sur un bassin aux intensités minimales d'infiltration FN déterminées sur parcelles ; on ne sait qu'une chose, c'est qu'il y a de bonnes raisons pour qu'elle leur soit nettement supérieure.

Pour la fin de l'averse en terrains imperméables, le coefficient de ruissellement de la traîne est tout à fait indicatif comme ceci a déjà été indiqué plus haut.

Enfin, les variations de coefficient de ruissellement suivant les tranches successives doivent respecter le coefficient de ruissellement global présenté au paragraphe 6. ; cette contrainte fournit une certaine garantie aux valeurs trouvées.

La fonction de transfert est assurée par l'hydrogramme unitaire dans le style le plus classique.

7.5.4. Calcul du débit décennal pour un bassin

Exemple : Surface = 1,1 km² Relief : I_g = 25 m/km
Infiltrabilité : Imperméable Averse décennale ponctuelle de 100 mm

Moins rare que les bassins imperméables avec pente de 60 m/km, c'est un type de bassin à très fort ruissellement assez fréquent au Sahel.

P₁₀ ponctuel = 100 mm Abattement : 100 %
 $\overline{P_{10}}$ = 100 mm, pluie moyenne sur la bassin
 Corps = 80,7 mm Durée : 80 minutes

Coefficient de ruissellement global : 78 % (voir paragraphe 6.)

Lame ruisselée : $0,78 \times 100 = 78 \text{ mm}$

Pluie d'imbibition : 3,8 mm

Pluie préliminaire : 1 mm

Pour les 4 premières tranches :

Pluie : 27,65 mm

Coefficient de ruissellement : 68,8 %

Lame ruisselée : 19,01 mm

Traine : Pluie 3,75 mm pendant 45 minutes

Coefficient de ruissellement : 55 %

Lame ruisselée de la traîne : 2,06 mm.

Averse secondaire : provoque un ruissellement secondaire de 1,94 mm.

Le tableau V présente la variation adoptée pour les coefficients de ruissellement en respectant les valeurs ci-dessus.

TABLEAU V

EXEMPLE DE VARIATION DES COEFFICIENTS DE RUISSÈLEMENT
(Tranche de 5 minutes)

Numéro de la tranche	Hauteur de pluie mm	Coefficient de ruissellement %	Lame ruisselée mm
1	3,47 (+ 1 -3,8)	60	0,40
2	6,26	68	4,26
3	7,34	78	5,73
4	9,58	90	8,62
5	11,83	93	11,00
6	9,75	101	9,85
7	7,33	105	7,70
8	5,83	108	6,30
9	4,67	108	5,04
10	3,33	108	3,60
11	3,08	108	3,33
12	2,33	105	2,45
13	1,92	102	1,96
14	1,58	100	1,58
15	1,42	100	1,42
16	1,00	80	0,80
TOTAL	80,72 mm		74,04 mm
Traine	3,75 (45 minutes)	55	2,06

En utilisant les hydrogrammes unitaires instantanés présentés au point 7.2., on obtient :

Temps de montée : $T_{m1} = 15,6$ minutes

Temps de base : $T_{b1} = 58$ minutes

Le temps de base de l'hydrogramme composé devient :

$$T_{b2} = 58 + 80 - 7,8 - 4 = 126 \text{ minutes}$$

avec la traîne $T_{b2t} = 126 + 45 = 171$ minutes.

Pour l'hydrogramme composé, le pas de temps du calcul est le demi-temps de montée, soit 7,8 minutes.

En recomposant les tranches de lame ruisselée du tableau V par pas de 7,8 minutes, on obtient l'hydrogramme composé en hauteur de ruissellement H_r .

Exemple :

$$1^\circ \text{ tranche : } 0,40 + 4,26 + 2,06 = 6,72 \text{ mm}$$

$$2^\circ \text{ tranche : } 3,67 + 7,92 = 11,59 \text{ mm}$$

$$3^\circ \text{ tranche : } 0,70 + 11 + 4,73 = 16,43 \text{ mm}$$

etc.

Pour chaque tranche, il est possible de calculer le volume ruisselé V_{r_i} en multipliant par la surface, et le débit moyen de ruissellement Q_{r_i} en divisant par le temps de base de l'hydrogramme unitaire instantané T_{b1}

$$V_{r_i} = H_r \cdot S = H_r \cdot 1100 \text{ m}^3$$

$$Q_{r_i} = V_{r_i} / T_{b1} = r \cdot \frac{H_r \cdot 1100}{58 \cdot 60} = H_r \cdot 0,316 \text{ m}^3/\text{s}$$

Le débit maximum de chaque tranche Q_i est obtenu en multipliant Q_{r_i} par $\alpha = 2,5$.

<u>Exemple :</u>	V_{r_i} m ³	Q_{r_i} m ³ /s	Q_i m ³ /s
1° tranche	7 390	2,12	5,31
2° tranche	12 749	3,66	9,15
3° tranche	18 073	5,19	12,98

La composition de l'ensemble des hydrogrammes instantanés permet d'obtenir le débit maximum de l'hydrogramme composé.

Temps (minutes)	35	36	37	38
Débit (m ³ /s)	29,58	29,78	29,98	29,17

$$\text{Volume ruisselé du corps} : Vr_{\text{corps}} = 74,04 \times 1\,100 = 81\,444 \text{ m}^3$$

$$\text{Volume ruisselé corps et traîne} : Vr_t = 76,1 \times 1\,100 = 83\,710 \text{ m}^3$$

$$\text{Volume ruisselé global} : Vr_{\text{global}} = 78,04 \times 1\,100 = 85\,844 \text{ m}^3$$

$$Tb_2 = 126 \times 60 = 7\,560 \text{ secondes} \quad Tb_{2t} = 171 \times 60 = 10\,260 \text{ secondes}$$

$$Qr_{\text{corps}} = \frac{81\,444}{7\,560} = 10,77 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Qr_t = \frac{83\,710}{10\,260} = 8,16 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Qr_{\text{global}} = \frac{85\,844}{7\,560} = 11,36 \text{ m}^3/\text{s}$$

On peut déduire de ces valeurs les coefficients de pointe :

$$a_1 = \frac{Q_{\text{max}}}{Qr_{\text{corps}}} = 2,78$$

$$a_2 = \frac{Q_{\text{max}}}{Qr_t} = 3,67$$

$$a_p = \frac{Q_{\text{max}}}{Qr_{\text{global}}} = 2,64$$

Sur le plan physique, c'est a_1 qui est le plus significatif ; sur le plan pratique, c'est a_p qui sera utilisé.

8. RESULTATS

8.1. Résultats bruts :

Ils sont donnés sous forme de tableaux qui ont été reportés en annexe 2 étant donné leur nombre. La surface des bassins a été limitée à 1 km². Pour des surfaces plus petites il est préférable de recourir à une autre méthodologie. On doit noter que la première catégorie étudiée Ig60 Imp correspond à un cas extrêmement rare au Sahel pour des surfaces égales ou supérieures à 1 km². Il est même possible qu'il n'en existe pas. De telles pentes correspondent en effet à des sols rocheux qui sont ou complètement disloqués, ou diaclasés en boules donc perméables, mais on en trouve au désert (cas du bassin de Bachikélé, au Tchad) pour des

précipitations décennales nettement inférieures à 70 mm par 24 heures. Cependant cette catégorie a été étudiée de façon assez exhaustive car elle correspond à une limite supérieure.

8.2 Temps de montée de l'hydrogramme composé

Pour un bassin donné T_{m2} est fonction de la forme du hyétogramme et notamment de la position dans le temps de la tranche maximale d'intensité et de la croissance des coefficients de ruissellement pendant la durée de l'averse. Il y a une corrélation relativement serrée entre l'intervalle de temps séparant le début de l'averse du maximum d'intensité et la durée du corps d'averse. La croissance des coefficients de ruissellement résulte de l'expérience acquise avec le dépouillement et l'interprétation des crues des bassins représentatifs. Le maximum du coefficient de ruissellement des différentes tranches d'averses se produit toujours après la tranche d'intensité maximale.

Ceci explique pourquoi le maximum de l'hydrogramme composé se situe significativement après le maximum d'intensité, mais le décalage est faible ; la dernière partie du corps a une influence négligeable sur la position du maximum et ceci ne changerait pas beaucoup si le corps était limité à 15 mm/h au lieu de 5 mm/h. Ceci justifie "a posteriori" notre pratique dans l'analyse des valeurs du temps de montée instantané T_{m1} ; en effet, on a considéré que l'averse est unitaire si le temps qui sépare le début du corps d'averse qui ruisselle de la fin de la tranche d'intensité maximale est inférieur à la moitié de T_{m1} à condition que les premières tranches qui suivent présentent une intensité faible par rapport à l'intensité maximale (au maximum 1/4 ou 1/5, voir RODIER (1986)).

Le degré d'incertitude sur la croissance du coefficient de ruissellement pèse sur la précision de la détermination de T_{m2} . Cependant les résultats sont comparables puisque nous avons suivi, pour tous nos bassins fictifs, les mêmes règles de croissance et on a montré plus haut que le degré de liberté, pour le choix des coefficients de chaque tranche d'intensité, était limité. Le tracé des hydrogrammes de chaque tranche de ruissellement peut amener des écarts artificiels entre les valeurs de T_{m2} pour les différents bassins. On peut considérer que les valeurs de T_{m2} du tableau de l'annexe 2, sont déterminées à 1 ou 2 minutes près pour la plupart des bassins et peut être à 4 ou 5 minutes près pour les valeurs de T_{m2} les plus longues (bassins à faible pente).

Malgré cette imprécision, on peut constater certaines tendances : T_{m2} croît avec la superficie des bassins et tend vers la valeur T_{m1} de l'hydrogramme instantané pour 10 km² dès que la pente s'affaiblit jusqu'à 15 m/km. L'écart entre les valeurs de T_{m2} pour P 24 h. 100 mm et P 24 h. 70 mm reste assez faible surtout pour les bassins imperméables et relativement imperméables à forte pente. L'influence de l'infiltrabilité est indéniable surtout lorsque les bassins sont perméables. Cette influence est importante pour les bassins à forte pente Ig 60 et Ig 25 où la réduction de T_{m2}

entre bassin "imperméable" et bassin "perméable" est de 25 à 30% pour une superficie de 1 km² ; cet écart décroît quand la superficie croît et il n'est plus que de 20 à 25% pour 10 km².

L'influence de la pente est prépondérante.

Ce paramètre T_{m2} est moins important que T_{m1} . Il sert uniquement à fournir un élément supplémentaire pour le tracé approximatif de l'hydrogramme de la crue décennale lorsqu'on en a besoin. Le tableau VI présente les valeurs de T_{m2} obtenues sur les bassins fictifs.

TABLEAU VI

Temps de montée de l'hydrogramme composé T_{m2}
Temps de montée de l'hydrogramme unitaire T_{m1}

	S = 1 km ²		S = 5 km ²		S = 10 km ²		
	T _{m1} min.	T _{m2} min	T _{m1} min.	T _{m2} min.	T _{m1} min.	T _{m2} min.	
lg 60 P24h. 100 mm	P2	7,5	29	11	32	14	33
	P3	7,5	27	11	31	14	32
	P4	7,5	21	11	25	14	26
lg 60 P24h. 70mm	P2	7,7	28	11	31	14	33
	P3	7,5	26	11	27	14	30
	P4	7,5	18	11	22	14	26
lg 25 P24h. 100mm	P2	15,5	37	24	39	30	45
	P3	15,5	35	24	42	30	44
lg 25 P24h. 70mm	P2	15,5	34	24	38	30	44
	P3	15,5	36	24	37	30	43
	P4	15,5	25	24	33	30	32
lg 15 P24h. 100mm	P2	25	47	37	54	46	60
	P3	25	39	37	48	46	54
	P4	25	37	-	-	46	50
lg 15 P24h. 70mm	P2	25	46	46	50	50	50
	P3	25	38	46	50	50	50
	P4	25	36	46		50	50
lg 7 P24h. 100mm	P2	40	64	66,5	72	85	85
	P3	40	56	66,5	73	85	85
lg 7 P24h. 70mm	P2	40	60	66,5	72	85	85
	P3	40	56	66,5		85	85

Sur le plan pratique on peut négliger les variations de T_{m2} avec les différentes valeurs de P_{10} 24h. Il est plus délicat de négliger l'influence de l'infiltrabilité (qui résulte de l'absorption des premières tranches d'intensité par la forte pluie nécessaire à l'imbibition) ; elle est sensible lorsque l'on passe d'un bassin relativement imperméable à un bassin perméable pour les fortes pentes et lorsque l'on passe d'un bassin imperméable à un bassin relativement imperméable pour des indices de pente égaux ou inférieures à 15 m/km.

En définitive, on proposera pour chaque indice de pente une courbe moyenne entre bassins imperméables et relativement imperméables pour les indices de pente supérieurs à 15 m/km.

En dessous, la courbe choisie se rapprochera davantage des valeurs pour bassins imperméables et on fixera un coefficient de réduction pour passer des bassins peu perméables aux bassins perméables. En fait, les courbes de T_{m2} en fonction de S peuvent être assimilées à des droites d'équation :

$$T_{m2} = 0,45 \times S + 27,5 \quad \text{pour } I_{g_{cor}} = 60 \text{ m/km}$$

avec réduction pour terrain perméable

$$30\% \text{ pour } S = 1 \text{ km}^2$$

$$20\% \text{ pour } S = 5 \text{ km}^2$$

$$18\% \text{ pour } S = 10 \text{ km}^2$$

$$T_{m2} = 1,02 \times S + 33,8 \quad \text{pour } I_{g_{cor}} = 25 \text{ m/km}$$

avec réduction pour terrain perméable

$$28\% \text{ pour } S = 1 \text{ km}^2$$

$$18\% \text{ pour } S = 5 \text{ km}^2$$

$$T_{m2} = 1,2 \times S + 44 \quad \text{pour } I_{g_{cor}} = 15 \text{ m/km}$$

avec réduction pour terrain perméable

$$15\% \text{ pour } S = 1 \text{ km}^2$$

$$5\% \text{ pour } S = 5 \text{ km}^2$$

$$T_{m2} = 2,5 \times S + 60 \quad \text{pour } I_{g_{cor}} = 7 \text{ m/km}$$

avec réduction pour terrain perméable

$$10\% \text{ pour } S = 1 \text{ km}^2$$

$$8\% \text{ pour } S = 5 \text{ km}^2$$

Pour $I_{g_{cor}} = 7 \text{ m/km}$, T_{m2} est très voisin ou égal à T_{m1} pour des terrains relativement

imperméables ou perméables dès que S atteint 5 km². On retrouve la limite donnée au sous-paragraphe 7.5.2.

Sur la figure 6 ont été représentées les droites donnant Tm2 en fonction de S pour les bassins imperméables.

8.3 Temps de base de l'hydrogramme composé

Les bassins à fort ruissellement présentent quelques difficultés car jusqu'à des intensités de l'ordre de 2 à 3 mm/h, au moins certaines parties du bassin ruissellent encore en fin d'averse. Lorsque la traîne est un peu longue comme dans le cas de l'averse décennale, le temps de base Tb2t de l'hydrogramme composé s'allonge beaucoup et la fin du ruissellement superficiel est alors très difficile à déterminer ; les valeurs de Tb2t seraient peu précises conduisant à des valeurs du coefficient de pointe qui s'écarteraient beaucoup des valeurs que l'on trouve sur les autres bassins. En plus, sur le plan statistique la durée du corps limitée à 5 mm/h est bien connue, la partie de la traîne pour des intensités inférieures à 5 mm/h l'est beaucoup moins.

On a donc considéré deux temps de base ; l'un correspond au ruissellement du corps d'averse limité à 5 mm/h, c'est Tb2 ; l'autre correspond à la totalité de la durée du ruissellement y compris celle de la fin de la traîne dont on a estimé la durée tant bien que mal, c'est Tb2t. On ne tient pas compte de la durée de ruissellement de l'averse secondaire qui suit l'averse principale. Cette valeur Tb2t très imprécise a été estimée surtout pour montrer comment dans ces conditions on trouve des valeurs très fortes de coefficient de pointe.

Le temps de base Tb2, présenté au tableau VII, très lié à la durée de la partie de l'averse qui ruisselle varie beaucoup avec le coefficient global de pente Ig, sensiblement avec l'infiltrabilité et légèrement avec la hauteur de la pluie décennale. Il croît comme Tb1 avec la superficie du bassin.

Pour définir des relations très simples avec les paramètres principaux nous négligerons l'influence de la hauteur de la pluie décennale de 24 h en adoptant la valeur moyenne de Tb2 pour une pluie décennale de 100 mm et 70 mm. Pour chaque valeur de Ig_{cor} choisie pour cette étude on tracera deux courbes de Tb2 en fonction de S : une pour un bassin "imperméable" l'autre pour un bassin "perméable". Ces courbes en principe se raccordent aux courbes de Tb1 établies pour l'hydrogramme instantané. En fait, on a remplacé ces deux courbes par des droites dont les équations sont les suivantes :

$$\begin{array}{lll} \text{I}_{\text{mp}} & & \text{Tb2} = 2,7 \text{ S} + 97 \\ \text{P.} & & \text{Tb2} = 2,3 \text{ S} + 77 \end{array}$$

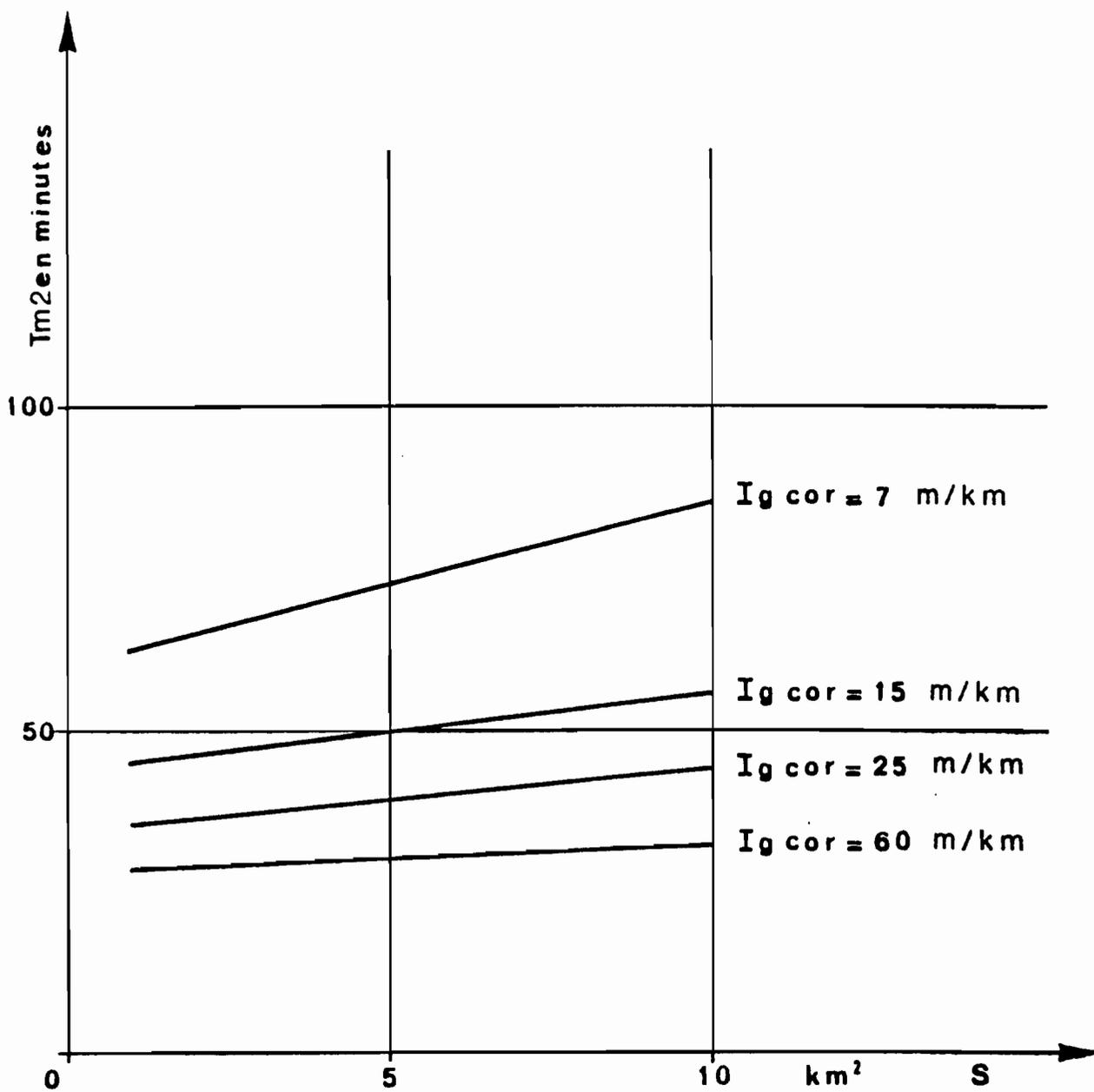


Fig.6 Temps de montée (T_{m2}) en fonction de la surface S pour des bassins imperméables

TABLEAU VII

Temps de base de l'hydrogramme composé Tb2 et Tb2t
 Temps de base de l'hydrogramme unitaire Tb1

	S = 1 km ²			S = 5 km ²			S = 10 km ²			
	Tb1 min.	Tb2 min.	Tb2t min.	Tb1	Tb2	Tb2t	Tb1	Tb2	Tb2t	
lg 60 P24h. 100mm	P2	32'	105	165	50	115	155	65	122	142
	P3	32	96	-	50	107	-	65	116	-
	P4	32	85	-	50	94	-	65	104	-
lg 60 P24h. 70mm	P2	32	93	126	50	103	118	65	115	-
	P3	32	89	-	50	97	-	65	110	-
	P4	32	73	-	50	84	-	65	95	-
lg 25 P24h. 100mm	P2	58	126	171	88	145	165	108	160	180
	P3	58	117	-	88	136	-	108	148	-
lg 25 P24h. 70mm	P2	58	115	135	88	135	-	108	150	-
	P3	58	110	-	88	129	-	108	141	-
	P4	58	100	-	88	120	-	108	137	-
lg 15 P24h. 100mm	P2	85	148	188	122	173	193	149	192	202
	P3	85	138	-	122	161	-	149	180	-
	P4	85	129	-	-	-	-	149	172	-
lg 15 P24h. 70mm	P2	85	137	147	122	161	-	149	182	-
	P3	85	131	-	122	156	-	149	172	-
	P4	85	117	-	-	-	-	149	163	-
lg 10 P24h. 100mm	P2	137	195	-	196	238	-	242	273	-
	P3	137	185	-	196	226	-	242	261	-
	P4	137	176	-	196	217	-	242	252	-
lg 10 P24h. 70mm	P2	137	184	-	196	226	-	242	262	-
	P3	137	178	-	196	221	-	242	253	-
	P4	137	164	-	196	211	-	242	245	-
lg 7 P24h. 100mm	P2	204	259	291	317	352	364	394	394	-
	P3	204	248	-	317	336	-	394	394	-
lg 7 P24h. 70mm	P2	204	248	253	317	340	-	394	394	-
	P3	204	241	-	317	324	-	394	394	-
lg 3 P24h. 100mm	P2	457	457	-	730	730	-	885	885	-
	P3	457	457	-	730	730	-	885	885	-
lg 3 P24h. 70mm	P2	457	457	-	730	730	-	885	885	-

$lg_{cor} = 25 \text{ m/km}$	Imp	$Tb2 = 4,1 S + 116,5$
	P.	$Tb2 = 4,1 S + 101$
$lg_{cor} = 15 \text{ m/km}$	Imp	$Tb2 = 5 S + 139$
	P.	$Tb2 = 5 S + 120$
$lg_{cor} = 10 \text{ m/km}$	Imp	$Tb2 = 8,9 S + 183$
	P.	$Tb2 = 8,9 S + 165$
$lg_{cor} = 7 \text{ m/km}$	Imp	$Tb2 = 13,9 S + 255$
	P.	$Tb2 = 19,6 S + 218$

L'ajustement de la droite est fait pour S compris entre 1 et 10 km^2 ; en conséquence, l'extrapolation de ces droites au-delà de 10 km^2 ne peut être tolérée que si elle est légère (jusqu'à 11 ou 12 km^2) car au-delà l'erreur devient trop forte. L'erreur due au remplacement de la courbe de $Tb2$ par une droite est de 2% au maximum sauf pour un indice de pente de 7 m/km. On s'est efforcé de la réduire au minimum pour les valeurs de S voisines de 1 km^2 pour lesquelles dans le sous-paragraphe suivant on admettra pour les applications pratiques une valeur du coefficient de pointe probablement un peu trop faible ; comme $Tb2$ donné par la droite est très légèrement supérieur à celui de la courbe, il en résulte par ces deux approximations des écarts qui se cumulent ce qui nécessite de faire passer les droites très près de la courbe pour 1 km^2 .

Pour $lg_{cor} = 7 \text{ m/km}$, les droites se raccordent aux courbes de $Tb1$ (voir paragraphe 7.5.2.) pour 8,3 km^2 en terrain imperméable et 3 km^2 en terrain perméable. La droite pour les terrains imperméables s'ajuste assez mal à la courbe ; les écarts sont voisins de 6% pour 1 km^2 et 5 km^2 ; mais, étant donné la faible précision avec laquelle on a déterminé la courbe donnant $Tb1$ en fonction de S , cet écart de 6% est tolérable bien que ce type de bassin soit assez courant au Sahel.

La figure 7 reproduit ces 8 courbes donnant $Tb2$ en fonction de la superficie.

La figure 8 présente la relation entre temps de base et indice de pente pour un bassin de 5 km^2 . Cette figure permet de voir une cassure nette aux alentours d'une pente de 15 m/km. Pour une pente inférieure à cette valeur, le temps de base augmente très rapidement lorsque la pente décroît. Par suite de la relation entre temps de base et débit moyen, le débit de pointe diminue lorsque la pente décroît et on retrouvera une cassure pour une pente de 15 m/km dans la relation débit de pointe en fonction de la pente.

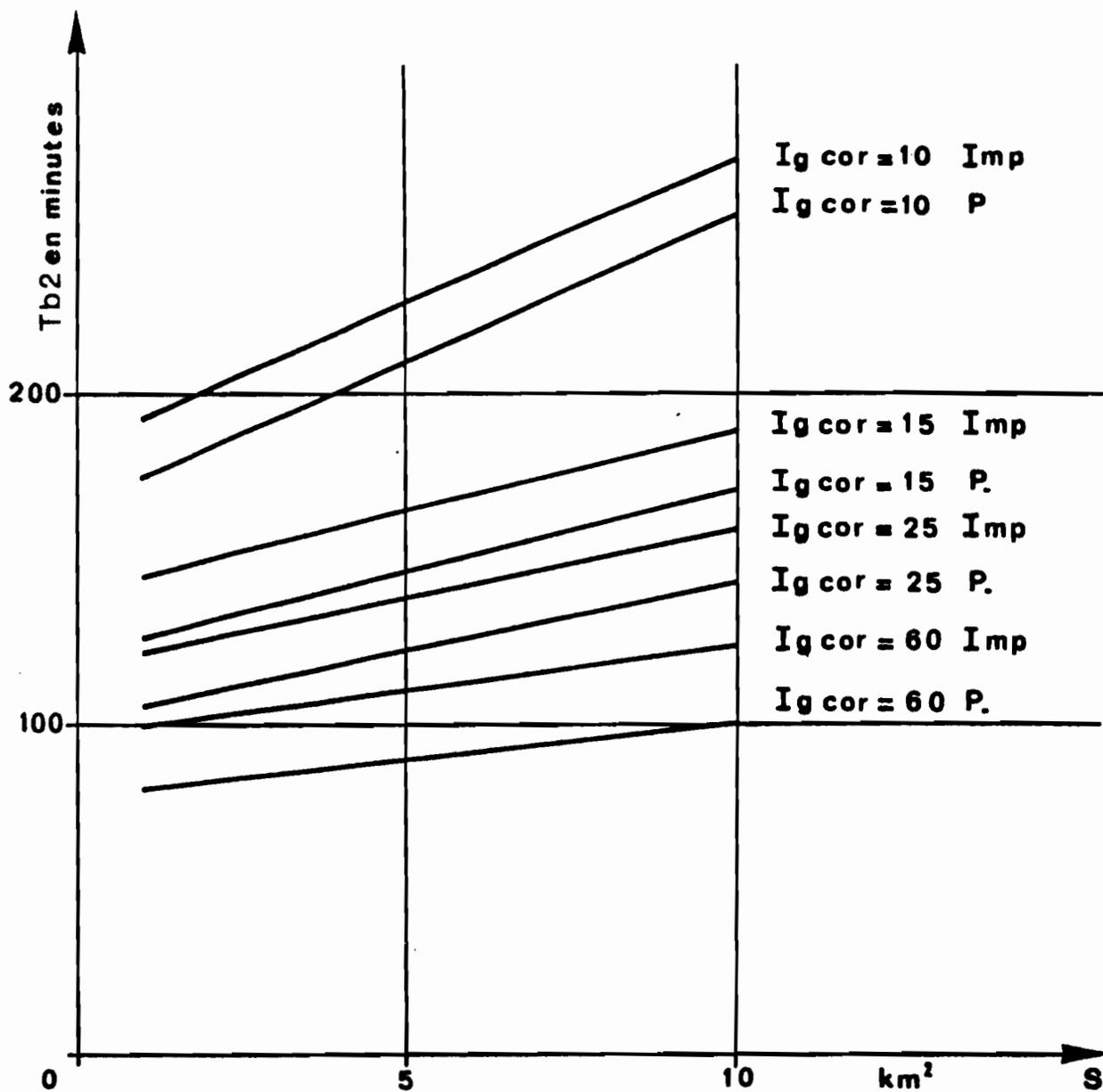


Fig.7 Temps de base (Tb2) en fonction de la surface S

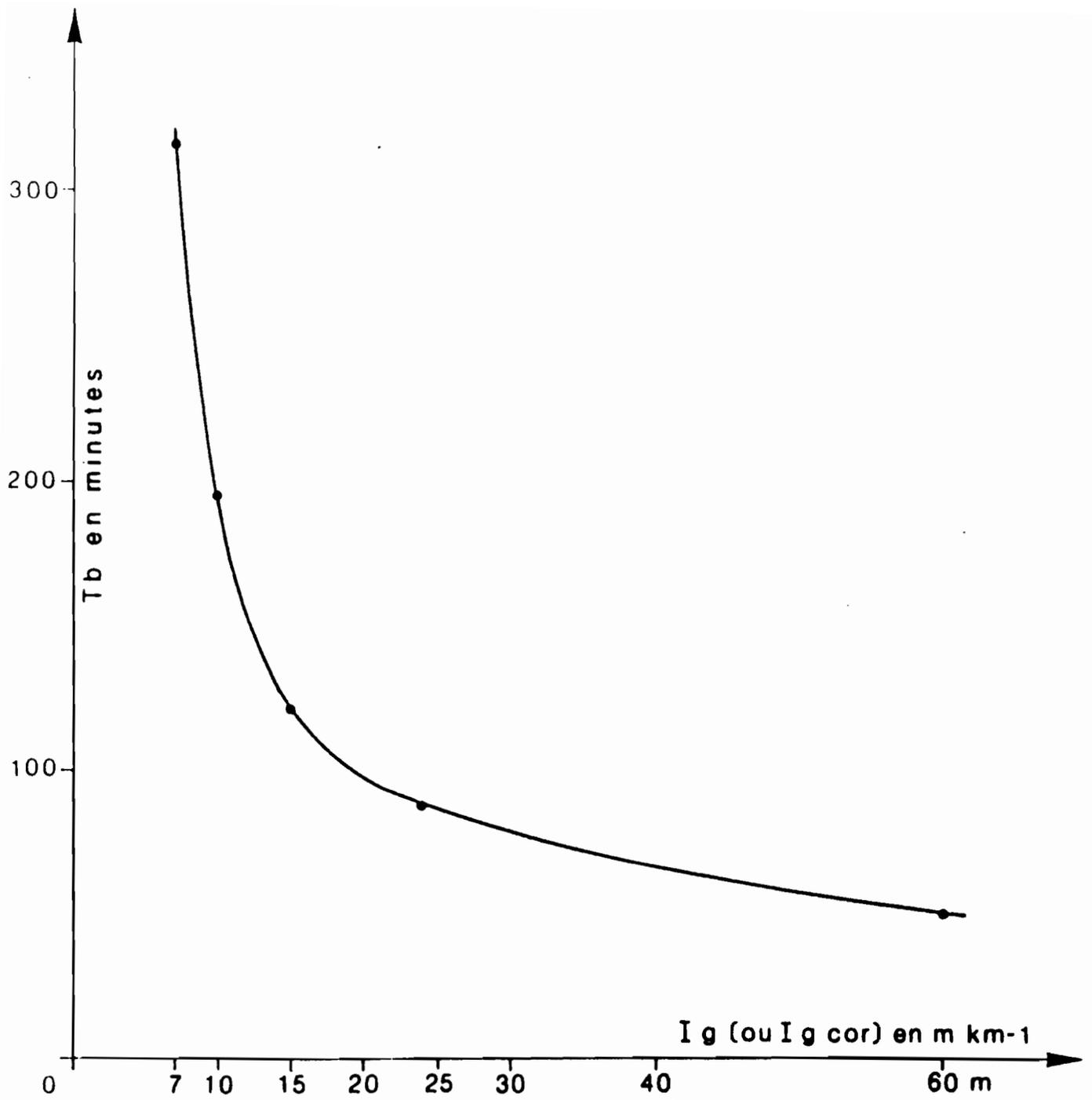


Fig. 8 Temps de base unitaire (T_b) en fonction de l'indice de pente du bassin (I_g)

8.4. Coefficients de pointe :

C'est le rapport du débit maximum de ruissellement au débit moyen de ruissellement pendant le temps de base de l'hydrogramme composé. Comme il y a plusieurs valeurs de T_{b2} pour les bassins "imperméables" (T_{b2} et T_{b2t}) il y aura plusieurs valeurs de α : α_1 et α_2 correspondant à ces deux valeurs du temps de base et aux volumes de ruissellement correspondants, le second comprenant le ruissellement de la fin de traîne. Nous en ajouterons une troisième α_p , la seule qui puisse être calculée en pratique : le temps de base T_{b2} est assez bien déterminé puisque la durée du corps limitée à 5 mm/h est assez bien déterminée ainsi que le volume de ruissellement total correspondant aux valeurs de K_r précisées au paragraphe 6 qui comprennent non seulement le ruissellement de fin de traîne mais aussi le ruissellement secondaire. Ce coefficient α_p est un peu arbitraire mais il est facile à calculer et l'hydrogramme qu'on reconstituerait avec les valeurs de T_{b2} et α_p serait peu différent de l'hydrogramme réel ; le volume de ruissellement global est proche du volume de ruissellement du corps d'averse principal.

On pouvait se demander si toutes les opérations conduisant à l'hydrogramme composé ne pourraient donner lieu à des valeurs du coefficient de pointe nettement supérieures ou inférieures à celles de l'hydrogramme unitaire et c'est pourquoi on a tenu à faire cette opération en explorant de façon aussi complète que possible les champs de variation de la superficie, de l'indice de pente corrigé et de l'infiltrabilité.

La forme du hyétogramme reste la même. Ce sont très sensiblement les formes types de LE BARBE et BOUVIER. Cependant des essais ont été faits avec un hyétogramme à une pointe suivie d'une bosse, forme qu'on a trouvé à Niamey pour une catégorie de corps d'averse, on a trouvé effectivement que le coefficient de pointe α_p passait pour 1,1 km², $I_{g_{cor}}$ 60, "imperméable" de 2,46 pour le hyétogramme de base à 2,1 pour le hyétogramme à deux bosses, réduction tout à fait significative qui conduirait à des valeurs sous estimées du débit de pointe.

Bien que les valeurs de α soient données avec deux décimales on ne peut guère espérer arriver à une précision réelle supérieure à 1 dixième de point. Les faibles variations de α_1 et de α_p qu'on peut déceler sur les tableaux de calcul ne sont donc pas obligatoirement significatives.

Mettons tout de suite à part le cas de α_2 : on trouve des valeurs relativement élevées de 2,7 à plus de 4 pour $I_{g_{cor}}$ supérieur ou égal à 15 m/km et pour des terrains "imperméables". Ce coefficient α_2 est croissant avec la pente et avec la pluie journalière décennale. Cependant toutes les précautions ont été prises dans la détermination du temps de base de l'hydrogramme instantané pour que ce temps de base ne soit pas majoré par le ruissellement de la traîne (RODIER, 1986). C'est ce ruissellement de la traîne qui n'avait été séparé en 1965 ni dans l'hydrogramme

instantané ni dans les hydrogrammes composés. Cela nous avait conduits à admettre des coefficients de pointe égaux à 3 (valeur d'ailleurs sous-estimée) pour des bassins imperméables à forte pente recevant de 700 à 900 mm par an. α_2 ne sera pas utilisé dans la pratique car on ne peut en déterminer qu'un ordre de grandeur.

L'examen de α_1 met en évidence des valeurs très peu variables, pratiquement entre 2,45 et 2,7. Il semble que α_1 décroisse légèrement lorsque la pente croît et peut être lorsque la superficie augmente mais ceci n'est pas très net.

Le coefficient de pointe α_1 , décroît lorsque l'infiltrabilité du bassin croît. Ce phénomène est masqué, dans le cas de la pluie décennale de 100 mm, par le fait que pour les bassins imperméables nous avons tronqué l'hydrogramme en éliminant le ruissellement de fin de traîne. Pour les bassins où ce ruissellement de fin de traîne n'existe pas on trouve bien une décroissance assez régulière du coefficient de pointe avec l'augmentation de l'infiltrabilité ; la durée du ruissellement pour une même surface et une même valeur de $I_{g_{cor}}$ diminue lorsqu'on passe d'un bassin "imperméable" à un bassin "perméable". α_1 n'est défini comme coefficient de pointe que pour des commodités de calcul pour les bassins imperméables. Pour les bassins perméables non seulement la fin mais encore le début de la traîne compris dans le corps ne ruissellent pas. Ce phénomène est moins net pour les bassins à pente moyenne ou faible pour lesquels la durée totale du ruissellement varie beaucoup moins (surtout dans le cas d'une pluie décennale de 70 mm). On rappelle ici que les valeurs du coefficient de pointe sont obtenues avec une imprécision de 5% de sorte que les faibles variations de ce coefficient sont assez difficiles à interpréter.

Ce qui précède n'est pas valable dans les cas où le caractère très particulier du réseau hydrographique, ou de la répartition des perméabilités ou des pentes vient modifier ce coefficient de pointe (voir questionnaire, annexe 1).

On avait craint que le passage de l'hydrogramme instantané à l'hydrogramme composé ne conduise dans certains cas à des valeurs très élevées ou très faibles de α_1 . Il n'en est rien, et on peut, dans la pratique, utiliser pour l'hydrogramme composé une valeur de α constante et égale à 2,6, les valeurs de α_p étant peu différentes de celles de α_1 en présentant les mêmes sens de variation. Cette valeur n'est pas la même que celle des bassins plus étendus ($\alpha = 2,5$) où l'hydrogramme décennal est unitaire mais la différence est inférieure à 5%. C'est là un des résultats les plus importants de la présente étude. Bien entendu, on ne tient pas compte ici des valeurs de α_1 obtenues pour les hydrogrammes des tranches décennales de 15 et de 30 minutes.

8.5. Débits de la crue décennale

8.5.1. Crues provoquées par des tranches d'averse de 15 et 30 minutes

Pour les très petits bassins versants la crue calculée à partir de la pluie décennale de 24 h donne le volume décennal de crue mais le maximum de l'hydrogramme est en principe inférieur au maximum de fréquence décennal. Le temps de concentration pour 1 km^2 est souvent très inférieur à la durée du corps (80 minutes pour la pluie décennale de 100 mm) et il faudrait rechercher la valeur décennale d'une tranche d'averse beaucoup plus courte que 80 minutes pour obtenir la valeur du maximum décennal de débit. C'est pourquoi pour les bassins fictifs qui ruissellent le mieux on a calculé le débit maximum des hydrogrammes composés pour des tranches décennales de 15 et 30 minutes avec des hyétogrammes définis au sous-paragraphe 7.4.3. Si la pente croît et la superficie décroît c'est la tranche de 15' qui donne le débit maximum et non la tranche de 30'. Pour des indices de pente inférieurs ou égaux à 25 la différence entre ce maximum et celui de la pointe calculée en partant de la pluie journalière (en fait, à partir d'un corps d'averse de 80 minutes) est négligeable même pour une surface de 1 km^2 et une pluie décennale journalière de 100 mm.

La différence entre les deux valeurs maximales est de l'ordre de 12 à 14% pour 1 km^2 et des bassins "imperméables" à indice de pente 60 qui, comme nous l'avons indiqué plus haut, sont extrêmement rares. Elle est de l'ordre de 8 à 10% pour 1 km^2 , pour des bassins relativement imperméables. On doit noter que la méthodologie utilisée conduit à une incertitude de 2 à 3% sur le débit maximum ce qui explique une certaine dispersion dans les résultats.

Ceci montre que la simplification résultant du calcul du débit de pointe à partir de la pluie décennale journalière est parfaitement justifiée pour la presque totalité des cas rencontrés dans la pratique. Il n'en serait pas de même pour des bassins versants inférieurs à 1 km^2 comme c'est le cas en hydrologie urbaine.

8.5.2. Cas général

Les calculs sur bassins fictifs tels qu'ils sont présentés en 7.5.4 avaient pour objet principal l'étude du coefficient de pointe ; ils fournissent en plus un échantillon important de débits de pointe décennaux. Bien sûr il est bon de garder plus de suspicion envers ces débits que pour ceux qui seraient estimés sur bassins réels car dans la méthodologie de calcul certains éléments (la pluie d'imbibition, le temps de base T_{b1} , la variation des coefficients de ruissellement pour les tranches partielles successives de hyétogramme) sont de nature à fausser de façon systématique l'influence des divers facteurs du ruissellement sur le débit de crue décennale.

Par contre on se trouve devant un ensemble homogène sur le plan de la qualité des valeurs estimées ce qui n'est pas le cas pour les résultats des bassins réels ; par exemple certains ont reçu des averses supérieures ou égales à l'averse décennale, d'autres n'ont reçu que des pluies médiocres, la qualité de l'étalonnage est très inégale sur ces très petits bassins. Nous reviendrons sur ce point en 8.5.3.

En outre, les diverses perméabilités sont beaucoup mieux représentées dans les bassins fictifs. Enfin le cas des bassins où les facteurs secondaires de ruissellement sortent de l'ordinaire sont éliminés. Il est donc plus facile de procéder à une première analyse des facteurs du ruissellement à partir des tableaux données en annexe 2.

Une première remarque s'impose sur les valeurs les plus élevées du débit maximum de ruissellement données dans ces tableaux. On arrive respectivement à des débits spécifiques de 33,4 m³s⁻¹km⁻² et de 23,9 m³s⁻¹km⁻² pour des pluies décennales journalières de 100 mm et de 70 mm et pour une surface de 1 km². Rappelons que ces débits élevés sont valables pour des surfaces imperméables à forte pente qu'on peut trouver au désert ou au Nord du Sahara mais qui sont très rares dans le Sahel tropical tout au moins à l'Ouest de la frontière du Soudan.

Pour situer ces chiffres par rapport aux valeurs observées dans le monde, on peut indiquer que les valeurs maximales observées pour des bassins versants de moins de 3-4 km² atteignent ou dépassent 100 m³s⁻¹km⁻² pour des types de pluies différents de ceux du Sahel ; la fréquence est très probablement plus faible que la fréquence décennale mais l'information dont on dispose sur les très fortes crues pour des bassins aussi petits n'est pas très abondante. Malgré ces restrictions on peut considérer que même pour la fréquence décennale ces valeurs n'approchent pas les valeurs maximales mondiales. Les valeurs maximales des intensités des averses que nous avons utilisées dans nos calculs sont fortes mais non exceptionnelles et rien qu'au Sahel des valeurs nettement plus élevées ont été enregistrées sur les pluviographes des bassins représentatifs.

A l'opposé si les bassins perméables sont représentés quantitativement de façon suffisante dans les tableaux, les bases de départ sont médiocres. Le bassin le plus perméable, celui de Niamey Bao Trésor est constitué pour la plus grande partie de la surface par des sols très perméables souvent couverts de végétation qui ne ruissellent pas du tout ; mais la quasi totalité de l'écoulement était fournie par des toitures imperméables dont le ruissellement n'était pas trop mal collecté, quelques routes goudronnées et un réseau de drainage artificiel assez efficace. Il faut bien dire aussi que le bassin de Niamey VI qui était sensiblement à l'état naturel comporte lui aussi une partie notable de sa surface avec une faible perméabilité et cette surface est naturelle. Dans la catégorie "perméable" on admet d'ailleurs une proportion notable du bassin à faible perméabilité. S'il ne faut pas chercher une grande précision pour ces bassins perméables nous

avons de bonnes raisons de penser que les ordres de grandeurs sont acceptables, ce qui est suffisant en pratique pour ce genre de bassins.

8.5.3. Débits de pointe décennaux des bassins représentatifs

Grâce à l'analyse des caractéristiques des crues effectuées dans une étude antérieure (RODIER, 1986) complétée dans les paragraphes précédents, il a été possible de procéder à une révision des débits de pointe décennaux déterminés dans les rapports établis pour les différents bassins observés et repris généralement par DUBREUIL et *al.* (1972). On a comparé les résultats de cette révision avec les valeurs anciennes. On a également estimé les mêmes débits à partir des indices de pente corrigés et des règles simples correspondant aux relations données en 7.5.2. ainsi qu'en suivant les indications du questionnaire (Check list) en annexe 1. Cette étude riche en enseignement sur le ruissellement au Sahel mériterait à elle seule un long développement, mais dans le cadre de cet article, nous nous efforcerons de n'indiquer que l'essentiel.

8.5.3.1. Remarques préliminaires

Comme ceci a été indiqué plus haut l'ensemble de données de base n'est pas homogène. Dans la majorité des cas, ces très petits bassins n'ont été équipés que pour fournir des indications complémentaires ou indiquer une simple tendance. En outre, l'intérêt des données présente souvent un caractère inattendu. Nous donnerons quelques exemples.

Pour deux bassins secondaires observés pendant une seule saison le hasard a très bien fait les choses ; les bassins de Taraiman (Tchad) et de Diam Nadié (Sénégal) ont reçu des pluies exceptionnelles et ont été suivis avec beaucoup de soin par du personnel compétent. Dans le premier cas, bassin sur reg, les informations recueillies sur ce bassin sont du plus grand intérêt car la saison des pluies est très courte, et les temps de base sont peu différents de ceux du début de la saison des pluies. Pour le second bassin, l'épisode pluvieux très important observé en fin de saison des pluies conduit à un temps de base trop long par suite de la croissance des cultures et il est très difficile d'en déduire les temps de base du début de la saison des pluies. Un autre bassin, celui du Bodéo, a été suivi avec sérieux, mais les hydrogrammes ne sont généralement pas calés par rapport à l'échelle et le jaugeage du débit maximum a été fait très maladroitement. Cependant, une étude topographique fine de l'érosion a bien mis en évidence le fort ruissellement de sorte que l'ordre de grandeur de K_r est valable et les temps de base sont assez sûrs, ce qui justifie l'intérêt de ce bassin.

Mais il y a trois cas, par ailleurs, où l'extrapolation de la courbe de jaugeage est hasardeuse (Sofoya V), ou plus que douteuse (Kountkouzout SS, Kolel). Il est très difficile aussi d'arriver à une

bonne estimation des débits qui ne durent que quelques minutes dans ces trois cas. Les lits instables comme à Polaka ne facilitent pas non plus les choses. Cependant pour un bon nombre de stations l'étalonnage est suffisant.

On en conclut qu'il faudra s'attendre à trouver certains résultats un peu surprenants (dans un petit nombre de cas heureusement). Cet état de fait joint à l'imprécision inévitable des opérations de transposition de données, même dans des cas favorables, nous avait incité dans la note RODIER (1986) à procéder à des estimations parfois trop sommaires de certaines valeurs de K_r , de Tb_1 , et même de Ig_{cor} . Le calcul des débits de crues décennales nous a conduit à des études plus fouillées des archives et des rapports anciens. Cette analyse plus fine et l'existence de certains éléments nouveaux tels que les mesures récentes d'infiltration à Niamey ont donné lieu à une révision des valeurs de certaines caractéristiques données dans la note de 1986.

On a ainsi modifié les valeurs de Ig_{cor} pour Kountkouzout-barrage, Pô, Diam Nadié, Niamey VI et Sofaya V. La grande sensibilité des variations de Tb_1 pour les valeurs de Ig comprises entre 7 et 25 m/km a rendu cette révision indispensable dans les trois premiers cas. On a dû modifier aussi dans une très faible mesure les temps de base de Niamey VI, du Bouloré et de Pô. Enfin, on a revu les coefficients de ruissellement des bassins de Kountkouzout SS, de Tchalol, de Mogodé B et de Niamey VI ; ici les modifications sont plus fortes car il s'agit de données largement extrapolées. Pour Tchalol et Niamey, les rectifications sont de l'ordre de 10%, pour les deux autres bassins, elles sont beaucoup plus faibles. On trouvera en annexe 3 plus de détails sur ces rectifications avec leurs justifications. Elles n'entraînent pas de modifications dans les diagrammes de K_r ni dans les relations donnant Tb_1 et Tb_2 .

8.5.3.2. Détermination des débits de pointe décennaux : Méthodologie du calcul par hydrogramme composé :

On a suivi l'approche déterministe décrite plus haut pour la détermination des débits de pointe décennaux par hydrogramme composé. Pour des bassins représentatifs observés pendant une courte durée (contrairement à ceux de la Mare d'Oursi), elle s'impose au stade de la recherche, même si dans les applications pratiques et la transposition on choisit une approche de toute autre nature.

Un minimum de rigueur doit être respecté pour le choix de la pluie journalière ponctuelle (que nous avons parfois désignée improprement par P24h.10). C'est pourquoi la hauteur de cette pluie a été déterminée à partir des cartes publiées par le CIEH et plus précisément dans la note de synthèse qui mériterait d'être largement diffusée. Pour la fréquence décennale ce sont actuellement les meilleures cartes. Pour le Nord Cameroun on s'est inspiré des données de la

thèse de J.C. OLIVRY (Fleuves et Rivières du Cameroun, 1984). Pour certains bassins on avait dans la note antérieure utilisé la corrélation entre P10 et la pluie annuelle ce qui a conduit à des valeurs assez différentes par suite d'une trop forte dispersion.

Les surfaces de bassins, les indices de compacité et les indices de pente sont pris la plupart du temps dans DUBREUIL et *al.* (1972) et dans le rapport de la Mare d'Oursi, CHEVALLIER et *al.* (1985) avec parfois quelques corrections pour les deux derniers indices dans les conditions indiquées par RODIER (1986). Les coefficients d'abattement sont fournis par le dernier graphique de la note de VUILLAUME (1974). Les temps de base unitaire T_{b1} et les valeurs $Kr70$ et $Kr100$ ont été fournis par la note RODIER (1986) avec quelques corrections supplémentaires dont il a été question plus haut. Les valeurs de $Kr100$ à appliquer à un bassin versant de 6 km^2 , par exemple, s'entendent pour une pluie journalière ponctuelle de 100 mm et ont été calculées en tenant compte du coefficient d'abattement pour 6 km^2 . Pour le calcul du coefficient de la crue décennale, on a donc procédé à une interpolation linéaire entre les valeurs de $Kr100$ et $Kr70$ en se basant sur la valeur de la pluie journalière décennale ponctuelle P10 du bassin. On a alors multiplié la pluie moyenne décennale P10 (déjà affecté du coefficient d'abattement) par ce coefficient $Kr10$, pour obtenir la lame ruisselée.

Il existe un certain nombre de bassins (Kountkouzout SS, In Tiziouen II, Kolel et Kereng), pour lesquels la durée du corps d'averse correspondant à P24h.10 est trop longue, la valeur maximale décennale du débit de pointe étant obtenue pour des corps d'averse plus courts. On est parti dans ce cas des tranches de 15' ou de 30' décennales incorporées dans un corps d'averse et une pluie journalière comme il a été indiqué aux sous-paragraphe 7.4.3., 7.5.3. et 8.5.1..

Dans le cas général le calcul est conduit comme indiqué au sous-paragraphe 7.5.3. : l'averse est découpée en tranches de 5' pour le calcul des lames ruisselées, puis, on adopte un nouveau découpage en tranches de durée égale à la moitié du temps de montée pour construire les hydrogrammes unitaires avec les valeurs du temps de base T_{b1} et de α données par RODIER (1985). Dans les cas difficiles de Polaka et de Kolel on a précisé la forme de la courbe au voisinage de la pointe en s'inspirant des formes types données par le rapport de CHEVALLIER et *al.* (1985). Enfin on ajoute ces hydrogrammes unitaires pour aboutir à l'hydrogramme composé dont le débit de pointe est Q_{maxr} auquel on ajoute l'écoulement retardé correspondant, égal à la moitié du débit retardé observé pour les plus fortes crues à la fin du temps de base. On rappelle que pour séparer le ruissellement superficiel de l'écoulement retardé, RODIER (1986) trace une droite entre le début de l'hydrogramme et la fin du temps de base. Le temps de montée composé T_{m2} étant toujours bien inférieur à la moitié du temps de base, on voit que la valeur de l'écoulement retardé ajoutée à Q_{maxr} est déterminée par excès. On obtient ainsi Q_{max} qu'on désigne par Q_{max10N} pour le distinguer de Q_{max10R} valeur ancienne trouvée dans les rapports et de

Q_{max10S} dont il sera question en 8.5.4.. Enfin pour certains bassins ruisselant très bien avec des averses décennales fortes on a admis qu'une petite partie de la traîne ruisselait, comme ceci a été observé sur certains bassins représentatifs.

Les résultats sont présentés dans le tableau VIII des débits maximaux de crues décennales ou K_r est le coefficient de ruissellement de la crue décennale, Q_{maxR} , Q_{maxN} , et Q_{maxS} représentent Q_{max10R} , Q_{max10N} , et Q_{max10S} . La partie la plus intéressante de ce tableau est précisément l'ensemble des deux colonnes Q_{maxR} et Q_{maxN} et la comparaison qui s'impose (tableau IX).

Indiquons tout d'abord que dans ce domaine deux chiffres qui s'écartent de 10% correspondent à un bon accord, des écarts de 2,3 à 4% doivent être classés dans la catégorie des heureuses coïncidences. Ceci étant posé, il y a des écarts de 25 à 47% qui a priori sont abusifs, et nous les expliquerons.

Comme nous l'avons précisé dans une note antérieure, les temps de base unitaires et les coefficients de ruissellement tendent à être un peu plus faibles que dans les rapports anciens ; ces deux influences en sens inverse devraient aboutir à des débits de pointe voisins. Le fait de considérer des pluies de 24 h avec traîne notable, averse préliminaire et averse secondaire ruisselant peu tend à donner des valeurs de K_r plus faibles qu'avec les hypothèses de 1965. Cependant il reste le fait qu'on a pris autrefois des marges de sécurité plus ou moins fortes. Q_{maxN} devrait donc être à peu près systématiquement plus faible que Q_{maxR} .

Ce n'est vrai que dans 13 cas sur 22 et ceci pour les deux raisons suivantes : les crues décennales des bassins de la Mare d'Oursi ont été calculées à partir d'une averse ponctuelle de 73,2 mm alors que la carte CIEH indique 79 mm, écart dû au fait que la période d'observation de ces bassins représentatifs est en pleine sécheresse au Sahel avec au moins deux années ne recevant que des averses médiocres. Nous avons nous-mêmes adopté 75 mm. en pensant que ce chiffre était sous-estimé. En outre, nous avons volontairement adopté des temps de base de début de saison des pluies qui, au centre et au Sud du Sahel, sont nettement plus faibles que ceux de la fin alors que le coefficient de ruissellement pour la plupart des bassins étudiés ailleurs varie peu entre le début et la fin de la saison des pluies. Le rapport de la Mare d'Oursi n'utilise pas le temps de base mais la forme des hydrogrammes et cette forme est une forme moyenne pour l'ensemble de la saison des pluies correspondant donc à un temps de base nettement plus long. Sur le bassin des Outardes (Mare d'Oursi), par exemple, le temps de base passe de 300 à 400' de juillet à septembre, le débit maximum décennal peut être réduit dans des proportions un peu plus faibles. Ce phénomène se reproduit sur tous les autres bassins de la Mare d'Oursi (Burkina) étudiés dans la présente note (Jalafanka, Polaka, Tchalol et Gountouré) à l'exception de Kolel dont il sera question plus loin. Ceci conduit systématiquement à des valeurs plus fortes de Q_{maxN} .

TABLEAU VIII
Révision des débits maximaux de crues décennales
Bassins représentatifs couvrant moins de 10 km²

Bassin	Surf. Km ²	Infiltra- bilité	Ind. de pente lg _{cor}	P10 mm	$\overline{P10}$ mm	Kr %	Qmax R m ³ s ⁻¹	Qmax N m ³ s ⁻¹	Qmax S m ³ s ⁻¹	a S	Tb25 mn
Tikaré I	0,113	<u>R.Imp.</u>	75	91	91	23,3	(3)	(1,6)	-	-	-
Kountk. SS	0,265	<u>R.Imp.</u>	(50)	72(1)	72	49	6,9	6,7	-	-	-
In Tiz II	0,67	Imp.	61	39(2)	39	69	25	16	-	-	-
Ansouri	0,69	R.Imp.	22	91	91	23,8	8	6,4	-	-	-
Jalafanka	0,81	Imp.	7	79	79	60,9	6,7	7,6	6,35	2,6	266
Mogodé	0,94	R.Imp.	30	100	100	30	14	8,6	9,6	2,6	135(3)
Niamey VI	1,0	<u>P.</u>	(10)	91	91	16,8	-	5,4	4,00	2,6	174
Kolel	1,05	<u>R.Imp.</u>	75	58(4)	58	32	19	15(5)	-	-	-
Niamey BAO Trésor	1,54	T.P.	9	91	89	8	-	(6,0)	-	-	-
Sofoya V	1,63	Imp.	(20)?	61	59	51	-	(21)	(15,8)	2,6	123
In Tiz I	1,87	Imp.	25	54	53	68	36	29,8	28,2	2,6	108
Tikaré II	2,36	<u>R.Imp.</u>	(40)	91	86	17	18,5	13,8	15,9	2,6	99
Kaouara réduit	2,5	<u>Imp.</u>	18	84	79	68	50	48,4	50,2	3(8)	136
Diam-Nadié	2,6	<u>Imp.</u>	10,8	105(6)	99	42	15,5	17,8	24,9	2,6	196
In Azena	2,61	Imp.	27	54	50,9	60,3	-	26	27,5	2,6	129
Pô	2,71	Imp.	(12,8)	99	93	62	-	41,5	36,4	2,3(7)	167
Bodéo	3,45	Imp.	6,6	84	77	56	-	(25,3)	24	2,6	303
Bouloré	3,75	<u>Imp.</u>	58	105	97	45	55	61,8	68	2,6	107
Kereng	4	<u>Imp.</u>	37	77(10)	71	49	60	63	62	2,6	125
Leleng	4	R.Imp.	45	105	97	33	55	53	48,4	3(8)	140(3)
Kourien Doulien	7,8	<u>Imp.</u>	73	52	45	39	(40)	(34)	35,6	2,6	173(3)
Sinkoroni DSP	8,9		18	93	80	16		36,5			
Sinkoroni FSP	8,9	R.Imp.	18	93	80	27	40	50	51	2,6	166

TABLEAU VIII (suite)

Révision des débits maximaux de crues décennales
Bassins représentatifs couvrant moins de 10 km²

Bassin	Surf. Km ²	Infiltra-bilité	Ind. de pente I _{g_{cor}}	P10 mm	P10 mm	Kr %	Q _{max R} m ³ s ⁻¹	Q _{max N} m ³ s ⁻¹	Q _{max S} m ³ s ⁻¹	α S	Tb2S mn
Polaka	9,14	R.Imp.	15,5	79	68	26,5	46	55,5	49,3(9)	2,6	163
Tchalol	9,28	Imp.	15	79	68	48,5	44	55,6	53,9	1,9(7)	185
Oued Ali	10,4	R.Imp.	15	80	68	36,7	70	65	63,5	2,6	182
Taraïman	11,2	Imp.	3	83	70	49	17,5	17,2	16,2	2,4(7)	920
Abou-Goulem	12,3	P	22	93	79	17,5	40	50,2	47,2	2,6	160
Outardes	16,5	Imp.	7,2	79	66	42	40	51,2	43	2,6	

- (1) tranche de 30' décennale = 45,8 mm. P24h₁₀ = 77 mm.
- (2) tranche de 15' décennale = 24 mm. P24h₁₀ = 54 mm.
- (3) majoration de Tb2 : de 20% pour I comp. = 1,37 Leleng
de 30% pour I comp. = 1,42 Mogodé B
de 60% pour I comp. = 1,54 Kourien Doulien.
- (4) tranche de 15' décennale = 32 mm. P24h₁₀ = 79 mm.
- (5) Q_{max N} pour Kolel pour P24h₁₀ = 10,2, Q_{max S} = 10,4, αS = 3,2, Tb2S = 99
- (6) implantation du bassin supposée continentale 50 à 100 km du littoral du Sénégal.
- (7) réseau en arête de poisson unilatérale, (partiellement compensé par du ruissellement en nappes sur le reg de Taraïman) conduit à α plus faible surtout pour Tchalol.
- (8) réseau radial α = 3
- (9) bassin réduit S = 6,9 km².
- (10) tranche de 30' décennale = 58,5 mm (53,5 pour 4 km²) P24h₁₀ = 77 mm corps 70,7 mm pour 4 km².

TABLEAU IX

Comparaison des débits de pointes décennaux.

Qmax 10 R - Qmax 10 N - Qmax 10 S.

Bassin	Pays	$\frac{Q_{\max 10 N} - 1 \text{ en } \%}{Q_{\max 10 R}}$	$\frac{Q_{\max 10 S} - 1 \text{ en } \%}{Q_{\max 10 N}}$
Tikaré I	Burkina Faso	- 47	
Kountkouzout. S.S.	Niger	- 3	
In Tiz II	Niger	- 36	
Ansouri	Burkina Faso	- 8	
Jalafanka	Burkina Faso	+ 13	- 16
Mogodé B	Cameroun	- 39	+ 12
Kolel	Burkina Faso	- 21 (1)	+ 2 (2)
Niamey VI	Niger	-	- 26
Sofoya V	Tchad	-	- 25
In Tiz I	Niger	- 17	- 5
Tikaré II	Burkina Faso	- 25	+ 15
Kaouara réduit	Niger	- 4	+ 4
Diam-Nadié	Sénégal	+ 15	+ 40
In Azena	Niger		+ 6
Pô	Mauritanie		- 12
Bodéo	Burkina Faso		- 5
Bouloré	Cameroun	+ 12	+ 10
Kereng	Cameroun	+ 5	- 2
Leleng	Cameroun	- 4	- 9
Kourien-Doulien	Tchad	- 15	+ 5
Sinkoroni FSP	Mali	+ 25	
Polaka	Burkina Faso	+ 21	- 11
Tchalol	Burkina Faso	+ 26	- 3
Oued Ali	Mauritanie	- 3	- 2
Taraïman	Tchad	- 2	- 6
Abou Goulem	Tchad	+ 25	- 6
Outardes	Burkina Faso	+ 28	- 16

(1) tranche de 15' décennale

(2) comparaison entre QmaxN calculé pour P10 journalière. Les majorations de Tb2 et de α sont calculées sur cet exemple.

Pour le bassin d'Abou Goulem (Tchad) le choix de Tb_1 en début de saison des pluies conduit à des valeurs plus fortes de Q_{max10N} (Tb_1 à Abou Goulem avant le 15 août est voisin de 95', il passe à 102' après le 15 août).

D'après l'expérience acquise sur les bassins de l'ORSTOM la probabilité d'occurrence d'une très forte averse en début de saison des pluies paraît relativement élevée, et ne peut pas être négligée.

Pour le bassin de Sinkoroni (Mali) une bonne partie des sols perméables, saturés en fin de saison des pluies, relève fortement K_r ce qui compense largement la croissance de Tb_1 . Dans tous les cas cette augmentation de Tb_1 est due à la croissance de la végétation ; l'influence est moins forte au Nord de Sahel où la végétation est plus clairsemée et où la saison des pluies est plus courte.

Pour le Bouloré (Cameroun), les conditions de séparation du ruissellement étaient telles que le temps de base était très long et n'a pas été compensé par un coefficient de pointe relativement fort. Il faut dire qu'à cette époque, on n'utilisait pas ce coefficient et que les débits observés en 1954 avaient surpris ; on avait du mal à imaginer des crues beaucoup plus fortes, état d'esprit opposé à celui qui faisait prendre des marges de sécurité confortables pour d'autres bassins.

Le cas du bassin de Kolel (Mare d'Oursi), comme celui de Diam Nadié dont il sera question plus loin, est particulier. Pour le débit maximum observé, l'extrapolation de la courbe de tarage est très forte, (la pointe de débit est extrêmement courte) et l'extrapolation des vitesses moyennes conduit certainement à des débits beaucoup trop élevés dont nous n'avons pas tenu compte pour estimer Q_{maxN} . En outre, dans ce cas très particulier Tb varie peu de Juillet à Septembre, donc Q_{maxR} est nettement supérieur à Q_{maxN} au lieu de lui être inférieur.

Dans le cas général de Q_{maxN} nettement inférieur à Q_{maxR} , l'influence des marges de sécurité est forte. L'exemple le plus net est celui de Tikaré 1 où Q_{maxR} est égal à 1,47 Q_{maxN} ; or le débit de période de retour de deux ans dont l'estimation est en accord avec nos chiffres n'est que le cinquième du débit décennal alors qu'un rapport de 2 ou 3 serait plus vraisemblable (pour ce bassin perméable où ce rapport est assez élevé). C'est encore vrai pour Mogodé ($Q_{maxR} = 1,39 Q_{maxN}$) où, la durée d'observation étant courte, l'auteur a adopté pour la crue annuelle une valeur de K_r de 42 % alors que 35 % nous paraît un maximum ; la marge de sécurité est encore plus forte pour la crue décennale, mais à cette époque la réputation des crues du Nord Cameroun incitait à beaucoup de prudence.

On retrouve encore une très forte marge de sécurité pour In Tiziouen II où la lame ruisselée décennale calculée qui paraît très correcte devrait conduire à un débit de pointe décennal de 15 m³/s-1 si on s'inspirait des formes d'hydrogrammes observés alors que le rapport indique un débit de pointe décennal de 25 m³/s. Il est vrai qu'à cette époque on n'avait pas réalisé que les deux années d'observations 1959 et 1960 étaient des années vraiment humides.

Le cas de Tikaré II est particulier : dans le rapport on est parti de P10 = 105 mm manifestement trop fort alors que nous partons de P10 = 86 mm. ce qui explique un écart de 25 % pour les débits. Il y a encore quelques cas beaucoup moins nets de surestimation ; on savait à cette époque que nos chiffres étaient surestimés par prudence mais on pensait que cette surestimation ne dépassait pas 20 %. Les chiffres actuels QmaxN sont loin d'être parfaits, il est possible que ceux de Mogodé B et de Kolel soient légèrement sous-estimés et le choix du temps de base de début de saison des pluies conduit peut-être dans quelques cas à une certaine surestimation. Mais nous pensons avoir montré par les explications qui précèdent que l'ensemble des valeurs de QmaxN est nettement plus proche de la réalité que celles de QmaxR.

8.5.4. Détermination des débits de pointe décennaux : Méthodologie simplifiée

Dans un second temps il a semblé utile de calculer tous les débits de pointe décennaux correspondant à des averses journalières à partir des relations donnant Tb₂ (sous paragraphe 8.3) en fonction de S et de I_{g_{corr}}, de l'infiltrabilité, d'un coefficient de pointe = 2,6 comme indiqué en 8.4. et en suivant rigoureusement les directives du questionnaire en annexe, exactement comme le ferait un utilisateur des règles pratiques qui seront exposées plus en détail au paragraphe 9.

En l'absence du répertoire des aptitudes au ruissellement des couches superficielles du sol, nous sommes partis des coefficients de ruissellement indiqués dans le tableau II et non de ceux qui auraient été trouvés par l'utilisation des courbes de coefficient de ruissellement du paragraphe 6.. On obtient ainsi, en ajoutant l'écoulement retardé une nouvelle estimation simplifiée Qmax10S indiquée par Qmax S dans les tableaux VIII et IX.

La comparaison de QmaxN et QmaxS a été faite non pas pour vérifier la validité de la méthode (la méthodologie de principe est la même pour les deux séries de valeurs), mais pour avoir une idée de l'influence des écarts entre les chiffres de Tb₂ donnés par les relations linéaires simplifiées que nous avons adoptées et les valeurs réelles, du choix d'un coefficient de pointe constant et souvent conservatif et des directives données dans le questionnaire.

Nous n'avons considéré que les bassins dépassant 0,8 Km². Dans le cas de Kolel, nous avons comparé QmaxS à une valeur de QmaxN de 10,2 m³/s-1 que nous avons calculé pour une pluie décennale journalière.

Dans 86 % des cas l'écart entre QmaxS et QmaxN est compris entre + 15% et - 16% comme on pouvait s'y attendre. Dans 14% des cas soit pour trois bassins on trouve respectivement - 25% pour Sofoya, - 26% pour Niamey VI et + 40% pour Diam Nadié. Dans le premier cas, les valeurs de QmaxS comme de QmaxN correspondent à des évaluations très grossières. Pour Niamey VI, le bassin est assez hétérogène, avec des grès assez peu perméables et des sables qu'on pourrait classer en très perméables TP. On sait maintenant que ce sable couvert de végétation ne ruisselle pratiquement pas ce qui nous a amené à revoir Kr100. Cette forte hétérogénéité nous a amenés à revoir de très près Tb1 et l'indice de pente qui doit correspondre un peu plus à la seule partie qui ruisselle. Il faudrait donc considérer une surface réduite comme pour le bassin de Kaoura (Niger) qui possède une partie supérieure constituée de grès complètement disloqués qui ne ruissellent pratiquement pas. Malheureusement nous ne disposons pas pour Niamey VI de cartes détaillées des types de sols comme pour Polaka, par exemple.

Pour Polaka précisément, nous avons considéré un bassin réduit couvrant 6,9 Km² ; avec cette réduction l'écart avec QmaxN passe ainsi de -23% à - 11% ce qui montre l'intérêt d'une telle opération lorsque les infiltrabilités des divers types de sols sont bien contrastées et que les sols plus perméables sont bien groupés.

Le troisième cas aberrant, celui de Diam Nadié, s'explique lorsque l'on considère les temps de base : pour le calcul de QmaxN nous sommes partis d'un temps de base Tb1 de 210 min. qui nous a conduit à une valeur de Tb2 égale à 256 min. Pour le calcul de QmaxS on est parti d'une interpolation entre deux courbes (voir sous-paragraphe 8.3.) : pour une pente de 15 m/km, on obtient un temps de base Tb2 de 152 minutes, alors que pour une pente de 10 m/km, on obtient une valeur TB2 de 206 minutes. Or les deux courbes Tb2 sont établies à partir de valeurs de Tb1 de début de saison des pluies alors que la valeur de Tb1 de Diam Nadié 210 min. a été estimée à partir d'hydrogrammes de fin août, donc en fin de saison des pluies, où le bassin est cultivé à 100%. Un hydrogramme du début du mois d'août a été éliminé comme correspondant peut-être à un ruissellement partiel, ce qui est très vraisemblable ; il indiquait une valeur de Tb1 de 100 min. probablement un peu faible pour cette époque. Quoiqu'il en soit QmaxS a été calculé à partir d'une valeur de Tb2 de 197 min. alors que QmaxN correspondait à une valeur de Tb2 de 256 min., ce qui correspond à une majoration de Qmax10 de 30%.

Il se peut que dans ce cas le choix du début de la saison des pluies corresponde à une surestimation de Qmax10, mais il convient de rester prudent. Pour que l'ensemble des bassins

représentatifs donne des résultats homogènes on a affecté Diam Nadié (Sénégal) d'une pluie "continentale" ; une pluie littorale aurait une hauteur nettement plus élevée pour la même fréquence mais avec un corps moins concentré dans le temps.

Indépendamment du choix d'un bassin réduit pour Polaka, on a utilisé les corrections prévues dans le questionnaire à huit reprises : trois fois pour des bassins allongés (indices de compacité égaux à 1,37, 1,42 et 1,54), trois fois pour des réseaux hydrographiques en arêtes de poisson unilatérales (ou déportées) conduisant à des valeurs de α d'autant plus faibles que ce phénomène est très marqué (Tchalol, Pô, Taraïman), et deux fois pour un réseau nettement radial, celui de Mayo Leleng avec une valeur de α plus forte et celui de Kaoura. Il y avait un exemple bien meilleur de deux hydrogrammes décalés qui est à la base de ce phénomène lié aux réseaux en arêtes de poisson unilatérales : le cas du bassin de Kountkouzout-barrage où l'examen de l'ensemble des hydrogrammes est particulièrement frappant, mais il n'a pas été possible d'extrapoler suffisamment les coefficients de ruissellement pour déterminer la crue décennale.

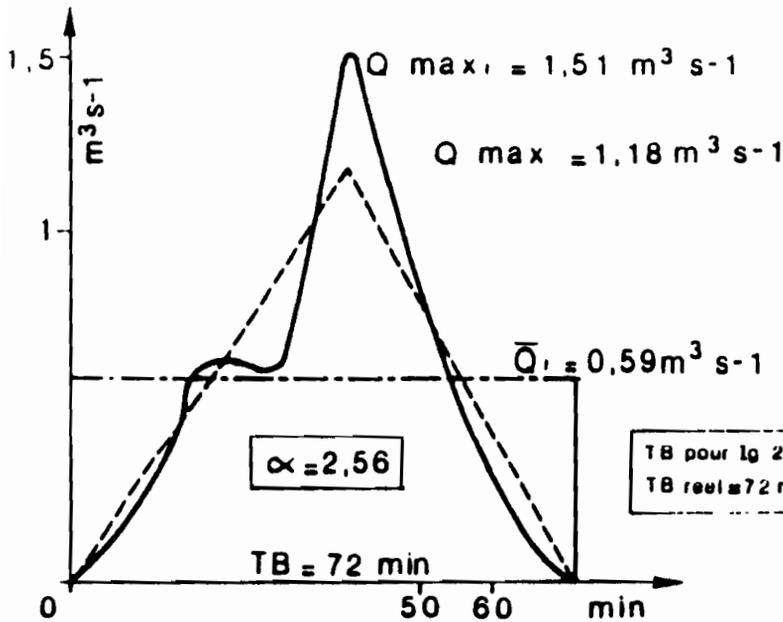
Il n'y a pas lieu de s'extasier devant l'efficacité de ces huit corrections puisque ces chiffres corrigés ont été déterminés en grande partie grâce aux données des bassins en question, mais il est certain qu'il fallait faire ces corrections et on voit là tous les services que peut rendre le questionnaire en évitant des erreurs qui peuvent être très importantes.

On peut voir aussi toute l'influence de la forme de l'hydrogramme sur les débits de pointe décennaux et la multiplicité des facteurs qui agissent sur cette forme. La détermination de la hauteur d'eau ruisselée (ou écoulée) n'est vraiment qu'une première étape, il y a autant de risques d'erreur dans ce qui suit. Le double exemple de Tchalol et de Polaka est vraiment typique : deux bassins pour lesquels les lames ruisselées varient presque du simple au double alors que les valeurs de Q_{max10N} sont les mêmes. Il n'est même pas exclu que celui qui ruisselle le moins (Polaka) ait une pointe de crue un peu plus forte que celui qui ruisselle le plus.

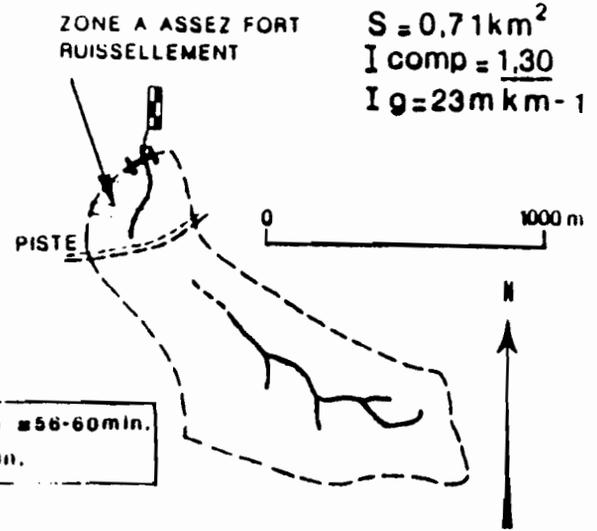
A partir d'une carte simplifiée de 5 bassins avec pour chacun un hydrogramme de forte crue, les figures 9 et 9bis illustrent les commentaires, ci-dessus, et surtout l'intérêt d'un questionnaire. On peut voir par exemple l'influence de la forme du réseau sur la forme de l'hydrogramme. Les tiretés correspondent à un hydrogramme en forme de triangle ($\alpha = 2$).

En utilisant l'hydrogramme de l'oued Ali comme modèle, on peut voir sur le cas de Tchalol, l'influence d'un réseau en arêtes déportées qui provoque une crue "molle" et justifie donc la valeur de 1,85 adoptée pour le coefficient de pointe α . Toujours par rapport à l'oued Ali, l'exemple de Kaoura montre le phénomène inverse : avec un réseau hydrographique radial, tous les tributaires participent simultanément à la pointe de crue, ce qui provoque une crue très

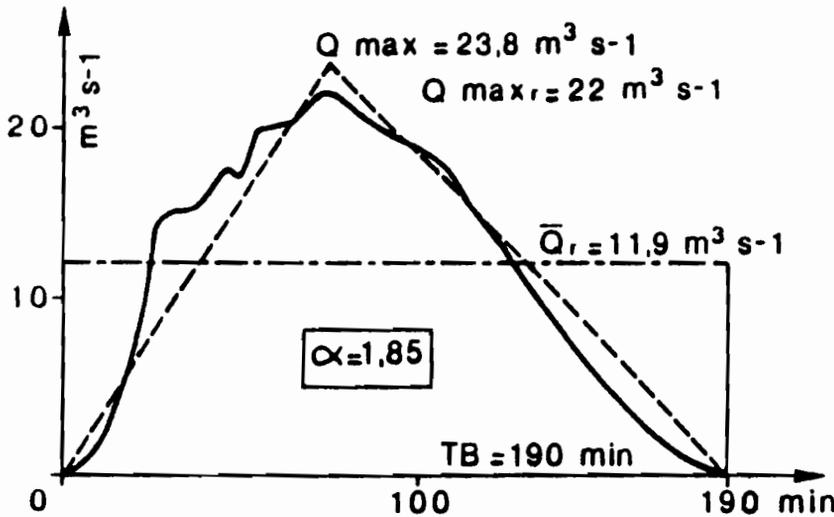
Fig. 9 VARIATIONS DE LA FORME DE L'HYDROGRAMME



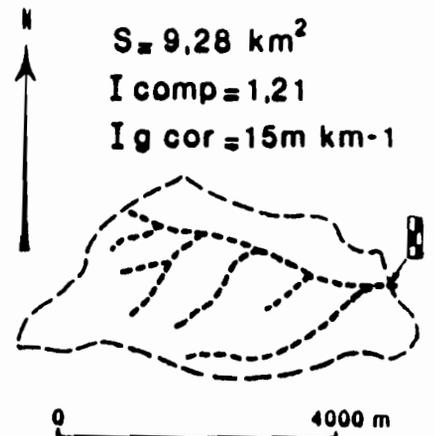
HYDROGRAMME DU 05-08-66 (élimination de l'effet de traîne)



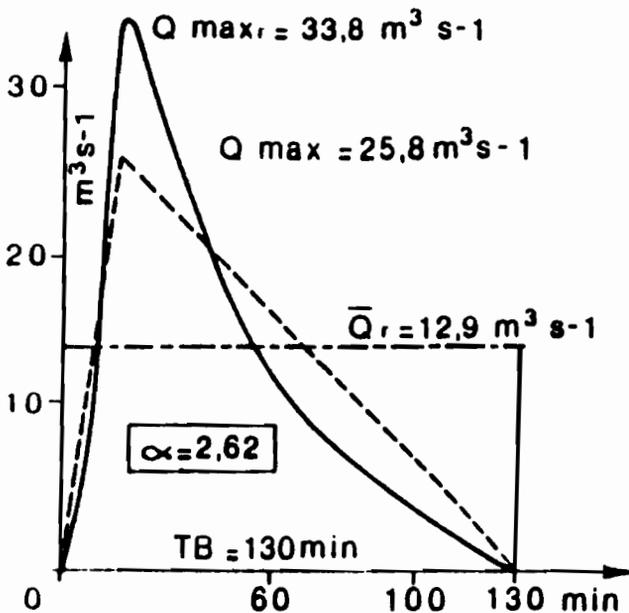
KOUNTKOUZOUT STATION BARRAGE
(Hydrogramme de ruissellement à 2 points)



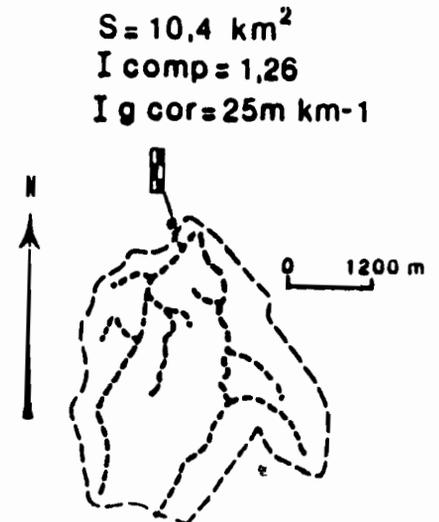
HYDROGRAMME DU 19-07-79 (corps d'averse existant de 25' le corps d'averse unitaire)
(élimination des avenes secondaires)



TCHALOL (Réseau hydrographique en arêtes déperitées)

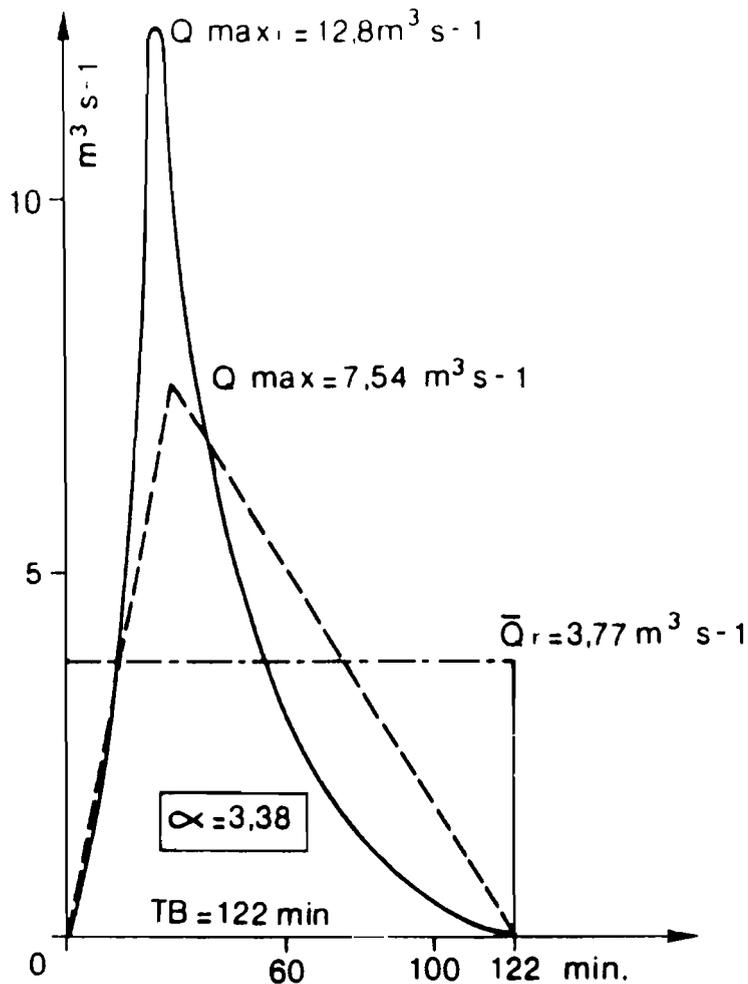


HYDROGRAMME DU 20-08-58 (élimination de la pointe secondaire du hyétogramme)

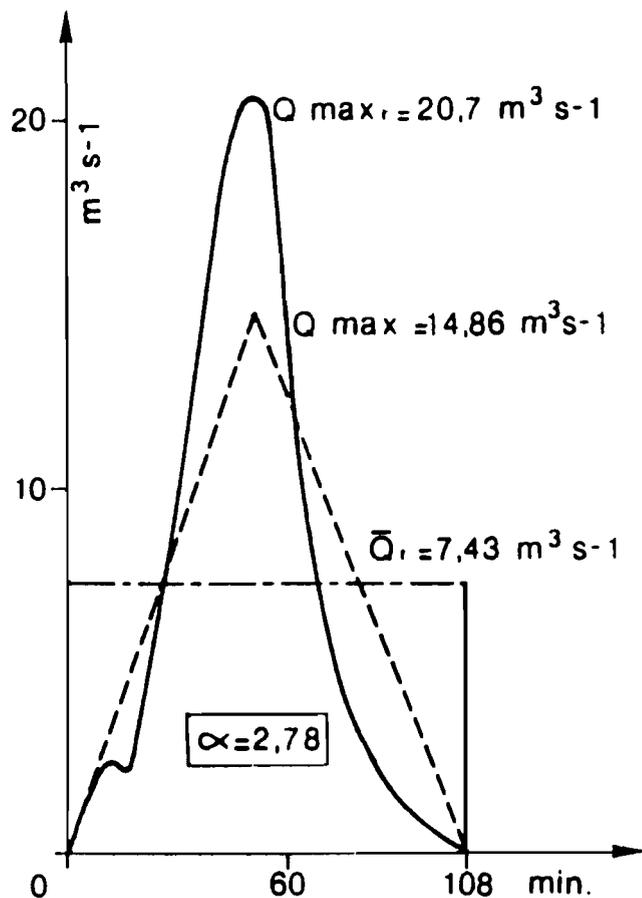
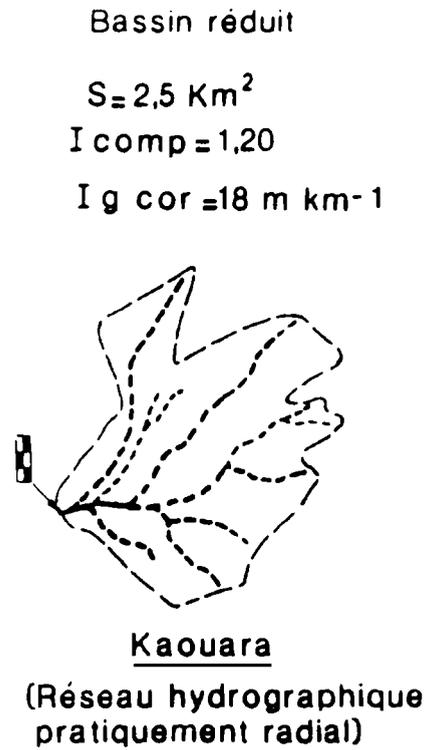


OUED ALI (Réseau hydrographique assez dendritique)

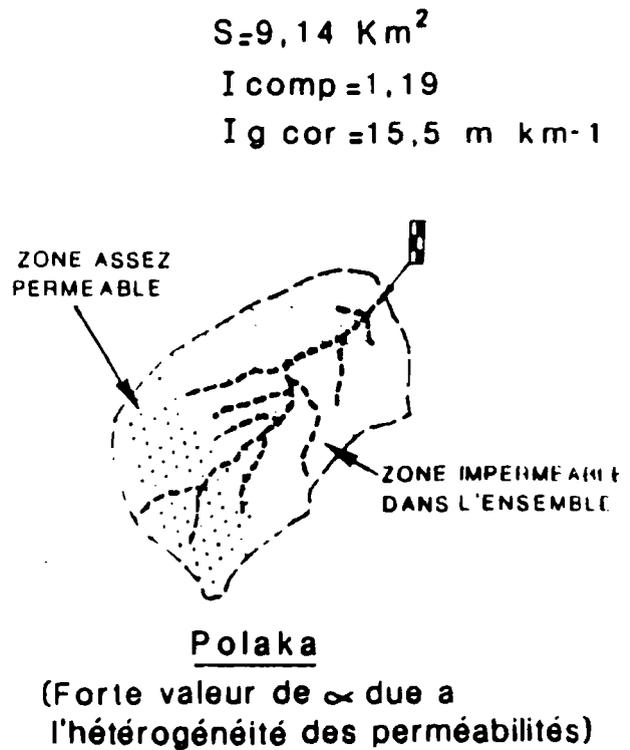
Fig.9 bis VARIATIONS DE LA FORME DE L'HYDROGRAMME



HYDROGRAMME DU 13-07-65 (presque unitaire)



HYDROGRAMME DU 09-06-80 (unitaire)

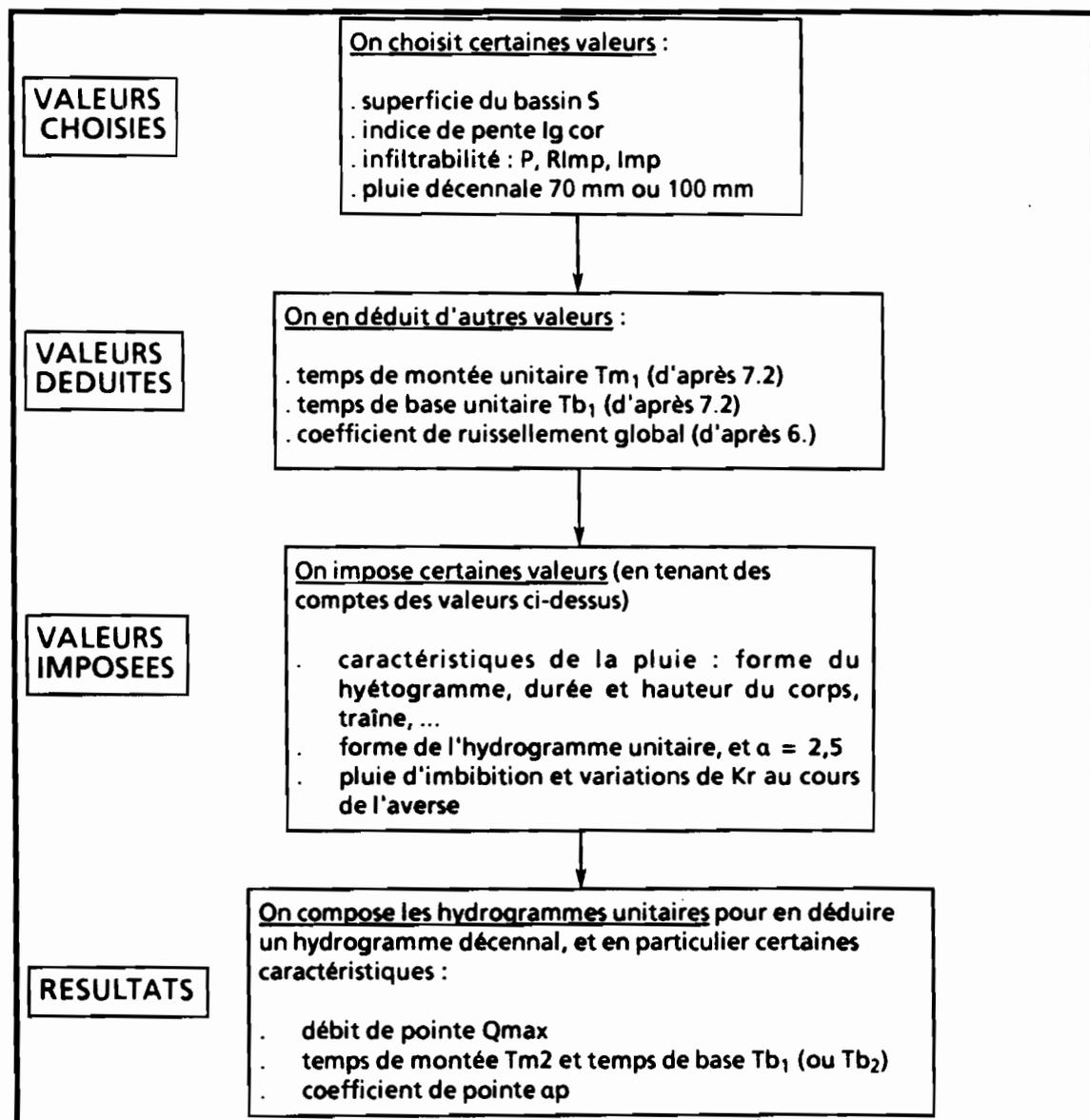


"pointue", et un coefficient de pointe de 3,38. Le bassin de Polaka est caractéristique pour son hétérogénéité des perméabilités, (point 3a 3a du questionnaire) ; la zone perméable étant en tête de bassin, il est préférable de travailler sur un bassin réduit à la zone imperméable. Enfin le bassin de Kountkouzout-station-barrage présente un hydrogramme de ruissellement à deux pointes du à une zone aval à assez fort ruissellement.

8.6. Commentaires sur les résultats

8.6.1. Remarques préliminaires

Le travail sur bassins fictifs peut paraître assez empirique. Vu la complexité des phénomènes naturels, c'est pourtant la seule démarche qui permette d'étudier la sensibilité de la méthode employée à la variation de chaque paramètre pris en compte. L'organigramme suivant permet de résumer la démarche appliquée aux bassins fictifs :



Grâce à cette démarche par bassin fictif, on peut balayer l'ensemble des variations possibles des paramètres qui nous intéressent ("valeurs choisies"), ce qui ne serait pas possible avec les bassins observés qui ne couvrent qu'une faible gamme des variations possibles. Mais on ne s'éloigne pas trop des caractéristiques observées car les "valeurs déduites", ont été obtenues avec des courbes tracées pour les bassins observés.

Les "valeurs imposées" sont des valeurs plausibles déduites des études sur la pluviographie (BOUVIER et LE BARBE en particulier) et de l'ensemble des connaissances accumulées par l'ORSTOM sur les bassins représentatifs au SAHEL. Ces "valeurs imposées" doivent de plus respecter les "valeurs choisies" et les "valeurs déduites", ce qui limite beaucoup le choix.

A partir du tableau de l'annexe 2, il paraît intéressant d'étudier séparément l'influence de chaque valeur choisie sur la caractéristique qui nous intéresse le plus, le débit maximum de ruissellement décennal.

8.6.2. Influence de la superficie :

La superficie S du bassin versant intervient dans plusieurs étapes du calcul de l'hydrogramme décennal :

- pour le calcul de l'abattement et des pluies moyennes P_{70} et P_{100} ,
- pour le calcul du temps de montée et du temps de base unitaire,
- pour le calcul du coefficient de ruissellement global,
- pour le calcul du débit maximum des hydrogrammes unitaires.

A partir de la démarche proposée, il n'est pas possible d'obtenir une équation analytique donnant Q_{max} en fonction de S . Seule une approche empirique peut permettre de répondre à la question : de combien augmente Q_{max} quand S augmente ?

* Quelle variation de superficie étudier ?

A partir du tableau de l'annexe 2, nous avons obtenu les résultats suivants :

De 5 à 10 km² ($\Delta S/S = 100\%$) le débit maximum augmente au plus de 71 %.

De 1 à 5 km² ($\Delta S/S = 400\%$) l'augmentation maximum du débit $\Delta Q/Q$ est de 250 %. Si on effectue une interpolation linéaire (ce qui n'est pas rigoureux mais permet d'atteindre un ordre

de grandeur), dans la gamme 1-5 km², une augmentation $\Delta S/S$ de 100 % conduit à une augmentation de débit $\Delta Q/Q$ de 63 %.

Pour obtenir les plus grandes variations de débit, nous avons donc choisi d'étudier la variation de superficie de 5 à 10 km².

* Quelles variations de Q en fonction de S ?

Les plus fortes variations de Q en fonction de S ont été obtenues avec les meilleures conditions de ruissellement : pluie décennale de 100 mm, indice de pente lg_{cor} de 60 m/km, bassin imperméable. Dans ces conditions, l'augmentation de 5 à 10 km² provoque une augmentation $\Delta Q/Q$ de 71 %.

Avec de moins bonnes conditions de ruissellement, $\Delta Q/Q$ devient beaucoup plus faible pour atteindre au minimum 34 % lorsque la pente est très faible (lg_{cor} de 3 m/km) et la pluie aussi (pluie journalière décennale de 70 mm).

Ce résultat nous paraît rassurant ; en effet, l'estimation de la superficie est beaucoup plus imprécise lorsque le bassin est peu pentu. Dans ce cas, l'erreur sur S que l'on risque de commettre aura une influence assez faible sur le débit décennal estimé.

* Comparaison avec la méthode du CIEH :

En utilisant la méthode des régressions multiples, le CIEH a obtenu une équation valable sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest :

$$Q_{10} = 197 \cdot S^{0,633} \cdot lg^{0,35} \cdot Pan^{-0,643}$$

Q_{10} : débit maximum de ruissellement décennal (m³/s)

S : superficie du bassin (km²)

lg : indice global de pente (m/km)

Pan : pluie moyenne interannuelle (mm)

Pour une augmentation de S_1 à S_2 de la superficie, on obtient :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{0,633} - 1$$

Pour $S_1 = 5 \text{ km}^2$ et $S_2 = 10 \text{ km}^2$ on a $\Delta Q/Q = 55 \%$

Ce résultat de 55 % est proche de la valeur moyenne $\Delta Q/Q$ trouvée sur les bassins fictifs. Mais, par la méthode du CIEH, la valeur $\Delta Q/Q$ est uniquement fonction de la valeur $\Delta S/S$ et ne varie donc pas avec les autres conditions de ruissellement ($I_{g_{cor}}$, P_{10} , infiltrabilité).

8.6.3. Influence de l'indice global de pente

Dans le calcul du débit maximum décennal par composition d'hydrogrammes unitaires, $I_{g_{cor}}$ intervient dans les étapes suivantes :

- pour le calcul du temps de montée et de base unitaire,
- pour le calcul du coefficient de ruissellement global.

Comme pour la superficie, nous avons étudié les variations du débit maximum en fonction de l'indice de pente d'une manière empirique ; le tableau suivant résume les résultats obtenus à partir des données du tableau de l'annexe 2.

PLUIE DECENNALE EN MM	SUPERFICIE EN KM ²	INFILTRABILITE	$\Delta Q/Q$ (en %)			
			Variation de $I_{g_{cor}}$ (en m/km)			
			de 3 à 7	de 7 à 15	de 15 à 25	de 25 à 60
100	1	Imp.	96	126	25	22
		R. Imp.	197	161	39	48
	10	Imp.	158	138	29	48
		R. Imp.	254	198	46	57
70	1	Imp.	106	125	19	36
		R. Imp.		190	30	45
	10	Imp.	159	140	44	48
		R. Imp.			44	46

Plusieurs constatations peuvent être faites sur ce tableau :

- Lorsque la pente est faible ($I_{g_{cor}}$ compris entre 3 et 15 m/km), une incertitude sur $I_{g_{cor}}$ provoque une plus forte variation du débit maximum que lorsque la pente est forte. Les courbes du débit maximum en fonction de $I_{g_{cor}}$ présentent une cassure vers $I_{g_{cor}}$ 20 m/km correspondant à celle observée pour Tb_1 en fonction de I_g ; c'est ce qui a conduit d'ailleurs à

considérer une estimation plus fine de la pente en définissant I_{gcor} qui tient mieux compte que I_g des pentes transversales.

- L'influence de I_{gcor} sur le débit est plus importante lorsque le bassin est relativement imperméable (R Imp.) lorsque la pluie décennale est de 100 mm et lorsque la superficie du bassin est grande ($S = 10 \text{ km}^2$).
- L'influence de I_{gcor} sur le débit est la plus forte lorsque I_{gcor} passe de 3 à 7 m/km avec les valeurs suivantes :

$P_{10} = 100 \text{ mm}$, $S = 10 \text{ km}^2$ et infiltrabilité = R Imp..

La valeur de $\Delta Q/Q = 254 \%$ est considérable.

En conclusion, pour éviter une erreur importante sur le débit estimé, l'indice de pente doit être calculé avec beaucoup de soin, car malheureusement sur un bassin extrêmement plat, avec peu d'éléments cartographiques, il est extrêmement facile de faire une erreur de plus de 100 % sur I_{gcor} . Par contre, dans le cas de bassin plat (indice de pente inférieur à 15 m/km) et avec un sol relativement imperméable (R Imp.) les débits décennaux estimés sont faibles ($Q_{max} < 50 \text{ m}^3/\text{s}$), ce qui permet de prendre une marge de sécurité plus importante avec une augmentation raisonnable du coût de l'ouvrage.

On peut rappeler la formule générale donnée par le CIEH : $Q = 197 \cdot S^{0,633} \cdot I_g^{0,35} \cdot P_{an}^{-0,643}$

ce qui conduit à
$$\frac{\Delta Q}{Q} = \left(\frac{I_{g_2}}{I_{g_1}} \right)^{0,35} - 1$$

Pour $I_{g_2} = 7 \text{ m/km}$ et $I_{g_1} = 3 \text{ m/km}$, on obtient $\Delta Q/Q = 33\%$.

Cette valeur est très inférieure aux résultats présentés dans le tableau précédent.

8.6.4. Influence de la hauteur de pluie décennale :

Les bassins fictifs présentés ont été calculés pour une pluie décennale ponctuelle de 70 mm et de 100 mm. Nous pouvons donc comparer les valeurs du débit décennal estimé avec ces deux hauteurs de pluie.

Pour une augmentation de pluie de 70 à 100 mm, l'augmentation relative du débit $\Delta Q/Q$ est comprise entre 40 et 87 %.

A l'intérieur de cette gamme de variation de $\Delta Q/Q$ en fonction de la pluie, on peut faire les observations suivantes :

- pour un même indice de pente, et une même superficie, $\Delta Q/Q$ augmente quand on passe d'un sol imperméable (Imp.) à un sol perméable (P),
- pour un même indice de pente et une infiltrabilité donnée, $\Delta Q/Q$ augmente très légèrement avec la superficie,
- il n'y a pas de variation de $\Delta Q/Q$ notable lorsque l'indice de pente augmente,
- $\Delta Q/Q$ est minimum (40 %) lorsque $I_{g_{cor}}$ est égal à 60 m/km, 5 à 1 km² et sur un sol imperméable (Imp.),
- $\Delta Q/Q$ est maximum (87 %) lorsque $I_{g_{cor}}$ est égal à 7 m/km, 5 à 10 km², et sur un sol perméable (P).

Dans toutes les formules proposées par le CIEH, la hauteur de pluie décennale n'apparaît pas, mais elle est remplacée par la pluie annuelle. Or, l'exposant de cette pluie annuelle est négatif, ce qui hydrologiquement est absurde à première vue. Toutes proportions gardées, cela signifie que plus il pleut et moins le débit est important ? Mais en fait cet exposant négatif correspond à l'augmentation de densité du couvert végétal qui freine le ruissellement.

8.6.5. Influence de l'infiltrabilité :

Trois classes d'infiltrabilité ont été prises en compte dans le tableau des bassins fictifs : imperméable (Imp.) relativement imperméable (RImp.) et perméable (P). Mais les sols perméables ayant été moins étudiés (et peut-être moins fréquents au SAHEL ?), certaines catégories de bassins n'ont pas été considérées pour ce dernier type de sol.

Lorsqu'on fait varier l'infiltrabilité de "Imperméable" à "Relativement Imperméable", la variation des débits maxima $\Delta Q/Q$ est comprise entre 33 % et 231 % suivant les autres paramètres pris en compte (superficie, hauteur de pluie, indice de pente).

Pour une variation d'infiltrabilité de Relativement Imperméable à Perméable, la variation $\Delta Q/Q$ est comprise entre 61 et 97 %, mais ce calcul ne tient compte que de deux indices de pente : 60 et 15 m/km.

Le tableau suivant résume les résultats obtenus :

Pluie décennale en mm	Superficie en km ²	Indice de pente en m/km	$\Delta Q/Q$ (en %) en fonction de l'infiltrabilité	
			de R Imp. à Imp.	de P. à R Imp.
100	1	60	33	95
		25	62	
		15	80	65
		7	108	104
		3	213	
100	10	60	61	86
		25	71	
		15	93	61
		7	142	182
		3	231	
70	1	60	55	97
		25	65	
		15	80	91
		7	132	144
		3		
70	10	60	85	85
		25	82	
		15	83	76
		7		224
		3		

- $\Delta Q/Q$ est inversement proportionnel à lg_{cor} .
- Pour une même hauteur de pluie et un même lg_{cor} , on observe une légère augmentation de $\Delta Q/Q$ avec la surface.
- Pour une même superficie et un même indice lg_{cor} , on observe une légère augmentation de $\Delta Q/Q$ avec la hauteur de pluie.

Aucune des équations proposées par le CIEH ne permet d'étudier l'influence de l'infiltrabilité sur le débit décennal. Par contre, la géologie a été proposée comme facteur explicatif du coefficient de ruissellement Kr_{10} .

L'équation générale est de la forme :

$$Q_{10} = 0,163 \cdot S^{0,628} \cdot Ig^{0,26} \cdot Kr^{0,877}$$

- pour le sable : $Kr_S = 2 \cdot 10^7 \cdot Pan^{-2,2}$

- pour l'argile : $Kr_A = 300 \cdot Pan^{-0,3}$

S : superficie en km²

Ig : indice de pente en m/km

Kr : coefficient de ruissellement décennal

Pan : pluie moyenne interannuelle en mm.

En passant du sable à l'argile, on obtient :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{Q_A - Q_S}{Q_S} = \left(\frac{Kr_A}{Kr_S} \right)^{0,877} - 1 = \left(\frac{300}{2 \cdot 10^7} \right)^{0,877} \cdot Pan^{1,6663} - 1$$

$$\text{Pour Pan} = 500 \text{ mm} \quad \frac{\Delta Q}{Q} = 85 \%$$

$$\text{Pour Pan} = 800 \text{ mm} \quad \frac{\Delta Q}{Q} = 304 \%$$

Cette très forte augmentation de $\Delta Q/Q$ due à la pluie annuelle, n'est pas du tout en accord avec les résultats sur les bassins fictifs. Il est à noter qu'en moyenne le sable, étant intermédiaire entre P et Rimp., au chiffre de 304 % du CIEH correspond une valeur moyenne de 120 % dans la présente étude.

8.6.6. Influence de la check-list des points délicats à examiner :

Pour analyser l'intérêt de la check-list, il faut partir des estimations faites sur les bassins observés et présentés dans le tableau VIII.

Cette étape ne doit pas être considérée comme une validation de la méthode proposée ou de la check-list présentée. En effet, la validation, en terme de modélisation, signifie la vérification de modèle proposé sur des données n'ayant pas servi à la mise au point (ou calage) du modèle. Or l'échantillon des petits bassins observés au SAHEL est trop faible pour être séparé en deux, une partie pour le calage et une autre pour la validation.

Sur notre échantillon de 29 bassins du tableau VIII, il y a onze bassins particuliers qui ont imposé l'utilisation du questionnaire.

Dans 4 cas, il s'est agi d'une correction du coefficient de pointe α . La valeur maximum adoptée a été de 3, ce qui conduit à une augmentation du débit $\Delta Q/Q$ de 15 % par rapport à la valeur de 2,6 adoptée en règle générale pour α . La valeur minimum adoptée pour α a été de 1,9, soit une diminution relative du débit $\Delta Q/Q$ de 27 %.

Dans 3 cas, il y a eu correction du temps de base en fonction de l'indice de compacité. La plus forte correction pour le bassin de Kourien Doulien, a été de 60 %, ce qui induit une diminution du débit $\Delta Q/Q$ de 38 % par rapport à un bassin identique mais de compacité faible.

Dans 4 cas, la hauteur de pluie a été mise en cause. Pour deux bassins, (In Tiziouen II et Kolel), la hauteur à adopter doit être plus faible que la hauteur journalière décennale car il s'agit de très petits bassins (inférieurs à 1 km²) avec une forte pente ($I_{g_{cor}}$ supérieur à 60 m/km). Cela a conduit à une diminution du débit au maximum de 28 % en employant une hauteur décennale en 15 minutes dans un hyétogramme de récurrence plus faible. Pour le bassin du Mayo Kereng on a dû considérer une tranche de 30 minutes. Le bassin de Diam Nadié est un bassin influencé par le climat océanique et est en plus cultivé à 100 %. Comme il a été dit en 8.5.4., cela a pu conduire à une majoration du débit de l'ordre de 30 %.

Pour le bassin de Polaka, la superficie a été réduite après constatation d'aptitude au ruissellement nulle en amont du bassin. Cette réduction de superficie a induit une diminution du débit $\Delta Q/Q$ de 25 %.

En conclusion de ce paragraphe, on peut remarquer que les corrections imposées par la check-list conduisent à des variations inférieurs à 40 % sur les débits, mais cette remarque n'enlève en rien l'intérêt de la check-list car on peut faire plusieurs observations :

- les bassins observés par l'ORSTOM au SAHEL ne présentent pas toute la gamme des particularités des petits bassins sahéliens. Il est tout à fait possible de trouver des particularités très marquées qui conduiraient à des erreurs beaucoup plus importantes sur les débits,
- les particularités mises en évidence par la check-list peuvent permettre de mieux caractériser le bassin concerné ; une diminution de superficie, par exemple, permettra de classer le reste du bassin dans une catégorie d'infiltrabilité plus forte qui est plus en rapport avec le comportement hydrologique du bassin,

- il faut faire attention aux bassins qui présentent plusieurs particularités dont l'influence peut se cumuler ce qui introduit de très fortes incertitudes sur les débits.

8.6.7. Conclusion :

A partir des résultats ci-dessus concernant l'influence de chaque facteur pris séparément sur l'estimation du débit, il est possible de faire un récapitulatif des erreurs possibles dans le cas de l'estimation du débit décennal sur un bassin inconnu.

Il y a deux types d'erreurs possibles : celles liées à la méthode et celles liées aux observations.

Le principal résultat de la méthode est le débit décennal qui est une valeur fictive, c'est-à-dire impossible à comparer à une valeur observée. En conséquence, les erreurs liées à la méthode ne pourront pas être correctement quantifiées. On peut toutefois noter que les diagrammes donnant le temps de montée, le temps de base et le coefficient de ruissellement global montrent une certaine dispersion lorsqu'on y porte les valeurs obtenues sur les bassins observés. L'écart entre la valeur observée et la valeur donnée par la courbe pour les conditions de relief et d'infiltrabilité correspondantes peut s'expliquer dans tous les cas par une particularité du bassin ou par une incertitude sur la catégorie choisie (relief ou infiltrabilité).

Les erreurs liées aux observations peuvent être présentées sous forme d'un tableau ; pour chaque paramètre pris en compte dans la méthode, on a porté la valeur maximum de l'erreur sur le débit de pointe pour une erreur plausible sur la valeur observée.

Paramètre	Erreur plausible	Erreur relative maximum $\Delta Q/Q$	Commentaires
P_{10}	30 mm (de 70 à 100)	87 %	S = 10 km ² lg _{cor} = 7 m/km Sol Perméable
S	100 % (de 5 à 10 km ²)	71 %	P_{10} = 100 mm lg _{cor} = 60 m/km Sol Imperméable
lg _{cor}	de 1 indice de relief (de 3 à 7 m/km)	254 %	P_{10} = 100 mm S = 10 km ² Sol Relativement Imperméable
Infiltrabilité	de 1 indice d'infiltrabilité (de R Imp. à Imp.)	231 %	P_{10} = 100 mm S = 10 km ² lg _{cor} = 3 m/km

Dans le tableau précédent, les paramètres ont été classés par ordre de difficulté d'estimation ou de précision que l'on peut espérer obtenir sur l'estimation faite à partir des observations.

On s'aperçoit que sur les deux premiers paramètres, la pluie décennale et la superficie, l'estimation que l'on peut obtenir est assez précise, mais qu'une erreur faite sur cette estimation n'induit pas une trop grosse erreur sur le débit de pointe.

Par contre, les deux autres paramètres, indice de pente et indice d'infiltrabilité, sont beaucoup plus difficiles à estimer, et pourtant ils influencent beaucoup plus le débit de pointe.

Il faut faire une mention spéciale pour la check-list. En effet, elle permet de mieux cerner les estimations des quatre paramètres ci-dessus. Il s'agit donc d'un garde-fou contre les erreurs liées aux observations, mais aussi contre les erreurs liées à la méthode en prenant en compte certaines particularités.

9. PRATIQUE DE L'ESTIMATION DES DEBITS DE POINTE DE CRUES DECENNALES POUR DES BASSINS VERSANTS DE 1 A 10 KM² :

Il ne saurait être question pour une étude pratique de reprendre toute la méthodologie utilisée au sous-paragraphe 8.5.3. pour les bassins représentatifs, le gain de précision serait illusoire pour un bassin versant non observé et les risques d'erreur seraient amplifiés. Nous avons une fois pour toutes procédé à l'opération de décomposition de l'averse principale de la pluie décennale en tranches d'intensité élémentaires, calculé les tranches de ruissellement en résultant, reconstitué l'hydrogramme de crue décennale (hydrogramme composé), et donné les règles pour retrouver son temps de base T_{b2} et le coefficient de pointe. Dans ces conditions, on procède comme pour les bassins de superficie plus grande pour lesquelles la pluie décennale est unitaire : on détermine la hauteur journalière de pluie moyenne sur le bassin en multipliant par le coefficient d'abattement, on détermine le coefficient de ruissellement en interpolant entre les courbes des figures 1 et 2.

On en déduit le volume de ruissellement qui, divisé par le temps de base de l'hydrogramme composé, T_{b2} , donne le débit moyen de ruissellement ; T_{b2} est fourni par les relations définies en 8.3. On en déduit le débit maximum de ruissellement en multipliant le débit moyen par le coefficient de pointe $\alpha = 2.6$.

Un certain nombre de corrections doivent éventuellement être apportées à certains paramètres utilisés, suivant les réponses au questionnaire dont il sera question en 9.2. On peut ajouter à ce

débit décennal de ruissellement une part de débit provenant de l'écoulement retardé et de l'écoulement de base ; cette correction est toujours inférieure à 10 % et souvent de l'ordre de 2 à 5 %. Dans l'avenir, certaines étapes risquent d'être modifiées et peut-être simplifiées, mais avant d'entreprendre quoique ce soit, il faut rassembler un minimum d'information sur le bassin et passer ces connaissances au "crible" grâce au questionnaire, pour éviter de faire des erreurs pouvant atteindre et dépasser 100 %.

9.1. Examen des caractéristiques physiques et de la couverture végétale du bassin versant :

Pour de si petites surfaces, les cartes usuelles sont souvent d'un faible secours ; on aura recours aux photographies aériennes (aux données des satellites si on peut en obtenir) et à une visite obligatoire sur le terrain.

Les observations devront porter à la fois sur la nature des versants et sur le réseau hydrographique ; la nature des couches superficielles des sols et l'état de fissuration ou de dislocation des roches sont essentielles. La photographie aérienne ou les données par satellite permettent de déterminer les proportions des divers types de sols ; les traces d'érosion en nappes et les ravines d'érosion donnent une idée de l'aptitude au ruissellement, de même qu'un réseau hydrographique bien net.

On devra observer la couverture végétale directement ou à partir de ce qu'il en reste en saison sèche. On attachera beaucoup d'attention aux surfaces cultivées et aux types de culture. Enfin on recherchera tout ce qui aura été aménagé par l'homme et qui serait susceptible de modifier l'écoulement ; une piste perpendiculaire à l'axe d'un bassin peut réduire très sérieusement le ruissellement s'il n'est pas trop violent, ou le détourner du bassin, un village peut constituer l'unique surface qui ruisselle dans un bassin perméable, etc.. L'écoulement, comme l'avait déjà remarqué AUVRAY en 1962 est particulièrement sensible à ces structures sur les très petits bassins versants.

Si on ne peut pas disposer d'un plan à courbes de niveau sur le bassin, il faudra se faire une idée des pentes avec si possible au moins quelques cotes. Il faudra observer à la fois la pente des versants et au moins celle du cours d'eau principal. Un manuel pour décrire ce qu'il faut voir et ce qu'il convient de faire de ce qui aura été observé serait utile mais on ne peut pas alourdir outre-mesure la présente note. On en aura une idée d'après les éléments à déterminer que nous reprenons ci-après.

La surface du bassin S ne présente pas de difficultés particulières en général, bien qu'une erreur sur les limites de bassin versant soit possible mais les petits bassins sont assez faciles à définir en zone sahélienne.

La forme du bassin peut être caractérisée par l'indice de compacité :

$$I_{comp} = 0,28 P/\sqrt{S} \text{ (P périmètre, S superficie).}$$

Pour évaluer I_{comp} , il faut simplifier dans une très large mesure le contour du bassin sinon I_{comp} sera surestimé, or l'amplitude des variations de cet indice est relativement faible. Le bassin de Kourien Doulien avec une valeur de $I_{comp} = 1,54$ est particulièrement allongé alors que $I_{comp} = 1$ pour un cercle. La meilleure façon de vérifier que la stylisation du périmètre est suffisante consiste à contrôler si la longueur du rectangle équivalent, dont il sera question plus loin, n'est pas trop supérieure à la longueur du plus long tributaire depuis son origine jusqu'à la station.

La pente est plus difficile à définir de façon simple. ROCHE, en 1963, avait défini un indice de pente assez satisfaisant qui malheureusement exigeait un plan convenable des bassins avec un nombre suffisant de lignes de niveau. MONIOD, en 1983, a défini un indice plus représentatif mais qui exige également une connaissance assez détaillée de la topographie du bassin. Devant de telles difficultés, DUBREUIL, en 1965, a recherché un indice plus facile à estimer avec des données sommaires, et qui ne puisse pas être faussé par les sinuosités des lignes de niveau : l'indice global de pente, en m par km. La pente est mesurée suivant la longueur du rectangle équivalent ayant la même surface et le même périmètre que le bassin versant après élimination de 5 % de la surface présentant les plus fortes altitudes, et de 5 % de la surface présentant les plus faibles altitudes, ceci pour éliminer l'influence de pitons rocheux ou de gorges près de l'exutoire, sans influence directe sur le ruissellement et qui viendrait fausser l'évaluation de l'indice de pente global. Nous nous en tenons à cet indice qui est lié surtout à la pente longitudinale en la corrigeant par la pente transversale I_t : $I_{gcor} = I_{g/2} + I_{t/2}$ lorsque I_t est nettement supérieur à I_g .

Après avoir déterminé l'indice de compacité, il conviendra de calculer la longueur du rectangle équivalent en km :

$$L = \frac{I_{comp} \sqrt{S}}{1,12} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{I_{comp}} \right)^2} \right)$$

Après avoir éliminé les altitudes extrêmes, on divisera la différence de niveau en mètres par L en km pour obtenir I_g en m km⁻¹. La pente moyenne transversale est déterminée sommairement par la moyenne sur 4 ou 6 lignes de plus grande pente sur les versants ; ces 4 ou 6 lignes doivent

comprendre à la fois les pentes les plus faibles et les plus fortes et au moins deux lignes correspondant à la pente la plus fréquente. Mais cette pente transversale n'est à déterminer que si elle est nettement différente de la pente longitudinale ; c'est surtout important pour les indices de pente inférieurs à 20 m km-1 pour lesquels une assez faible variation de Ig entraîne une variation notable du débit de crue décennal.

L'infiltrabilité des sols est l'élément le plus difficile à estimer, il faut bien réaliser d'abord que les bassins avec sol rigoureusement homogène sont très rares et que pour la transposition on a dû pousser plus loin la simplification. On a indiqué au paragraphe 6. la signification toute relative des trois grandes classes, Imperméable (Imp.), Relativement Imperméable (RImp.), et Perméable (P) comprises entre deux cas extrêmes assez théoriques, tout au moins pour le premier : Très Imperméable (TImp.) et Très Perméable (TP.) :

Dans le cas général, le bassin qualifié d'imperméable comporte certaines de ses parties assez perméables. Le bassin qualifié de relativement imperméable peut comporter les mêmes éléments mais la proportion de sols perméables est beaucoup plus forte, ce dernier bassin peut être aussi, beaucoup plus rarement, constitué par un sol homogène assez peu perméable.

Le bassin de Niamey VI qualifié de perméable est constitué de sables avec végétation, très perméables et de grès peu perméables dans une proportion que malheureusement nous ignorons, mais les sables sont prédominants. Lorsque les différentes catégories de sols sont imbriquées les unes dans les autres, on considère une perméabilité moyenne ; lorsqu'elles sont bien groupées, si les différences de perméabilité sont grandes, on peut considérer un bassin réduit à la partie la moins perméable comme on le verra plus loin. Lorsque le répertoire des aptitudes au ruissellement des couches superficielles du sol sera au point, on pourra donner un indice quantitatif de ruissellement ou au contraire d'infiltrabilité.

La présente étude a été conduite de façon à ce que ces résultats puissent être exploités dans les calculs, mais pour le moment il faut se contenter de quelque chose de beaucoup plus primitif. On rappellera ci-après quelques indications données au sous-paragraphe 8.1.

Un bassin imperméable Imp. comprend 85 à 90 % de sols imperméables, le reste étant constitué de sols perméables. Parmi les sols imperméables, on trouve : le rocher très sain et sans forte rugosité, le reg, les glacis, les colluvions argileuses, les argiles de bas-fond même avec fentes de retrait (à noter qu'un substratum schisteux correspond souvent à des sols argileux en surface), dans une certaine mesure des sols sablo argileux ou argilo sableux et même parfois sableux (certaines parties du bassin de Kountkouzout) s'ils sont recouverts d'une pellicule superficielle imperméable).

Un bassin relativement imperméable RImp. comprend en général un mélange en proportion à peu près égale de sol imperméable dont il a été question plus haut et de sol assez perméable. Si le bassin est homogène, il sera constitué de sol relativement imperméable tel que certains sols imperméables avec couverture végétale qui gêne la formation de pellicule imperméable, ou des sols à recouvrement gravillonnaire continu ou certaines arêtes granitiques (par exemple au Nord Cameroun, ou à l'Est du Tchad). Le bassin peut être également constitué de sols imperméables et de sols relativement imperméables.

Un bassin perméable. Il comprend des sols perméables tels que des éboulis rocheux avec produit de décomposition assez perméable, des cuirasses ferrugineuses complètement disloquées, des roches très diaclasées et disloquées (bassin de la Maggia au Niger) si la pente n'est pas négligeable (sinon ces sols sont très perméables), certains sols sableux sans pellicule imperméable ou avec couvert végétal de graminées, des sables grossiers.

On peut classer le bassin dans une catégorie ou entre deux catégories par exemple Imp. - RImp..

Le réseau hydrographique doit être caractérisé comme suit : réseau dendritique ou en arborescence, réseau en arêtes de poisson, réseau en arêtes unilatérales ou réseau déporté, et réseau radial. Le réseau dendritique donne les formes d'hydrogrammes les plus simples. C'est le réseau en arêtes unilatérales pour lequel les hydrogrammes des tributaires présentent le plus de difficultés à se fondre en un seul, d'où un coefficient de pointe trop faible ; un des exemples les plus nets est celui du bassin de Tchalo (Mare d'Oursi). Dans le cas d'un réseau radial, c'est-à-dire lorsque les formateurs sont d'égale importance et convergent vers le même point, les pointes de crues sont les plus fortes avec un coefficient de pointe supérieur à la moyenne 2,6. On trouvera beaucoup plus de détails dans l'introduction de DUBREUIL et *al.* (1972), qu'on pourrait d'ailleurs consulter pour d'autres caractéristiques des bassins. On vérifiera si le réseau hydrographique comporte ou non des ruptures de pente, des mares ou des marécages.

La dégradation hydrographique est encore peu marquée pour des bassins aussi petits. Cependant elle peut se produire. Le bassin du Bodéo (Burkina), si médiocres que soient les observations, montre un exemple indubitable de dégradation hydrographique (plus de lit mineur) lorsque la superficie du bassin croît de 3,45 à 11,2 km². Il semble qu'elle commence à se produire lorsque la pente descend en-dessous de 5 m/km.

DUBREUIL et VUILLAUME (1975) ont donné trois stades de dégradation qui pourraient se traduire par : pas de dégradation, dégradation modérée, dégradation presque complète. Dans le premier cas le lit mineur du ruisseau est net et continu ; dans le second cas le lit mineur existe encore mais il est au milieu d'un lit majeur actif plusieurs fois par an et il peut être encombré par

de la végétation arbustive ce qui aggrave les conditions d'écoulement. Dans le troisième cas, le lit mineur a disparu et l'écoulement se fait en nappe dans la dépression. Nous proposons d'ajouter deux étapes supplémentaires : entre le second et le troisième cas, lit mineur discontinu avec réseau de dépressions complexes et après le troisième cas le stade final de la dégradation, une mare à fond argileux où s'accumule et s'évapore l'écoulement mais cette mare peut se terminer par un seuil où un écoulement assez important peut se produire tous les cinq ans, les dix ans, ou les vingt ans. On devra donc déterminer le type et la gravité de la dégradation. Elle est non seulement moins fréquente, mais encore elle ne présente pas la multiplicité des formes que l'on rencontre au-delà de 100 km².

L'étendue des surfaces cultivées et le mode de culture sous l'angle des modifications de l'infiltrabilité ou des aptitudes au ruissellement doivent être étudiés à la fois sur les versants et dans le lit majeur, l'influence des cultures n'étant pas la même comme on le verra plus loin.

Enfin, toutes les structures aménagées par l'homme depuis les dispositifs (si sommaires soient-ils) de lutte anti-érosion jusqu'aux ponts et aux barrages, devront être notées avec si possible leurs caractéristiques intéressant l'écoulement.

9.2. Utilisation du questionnaire :

C'est là une pratique qui nous paraît obligatoire avant l'emploi de toute méthodologie d'estimation, car elle fournit des éléments pour procéder à cette estimation et elle limite sérieusement les risques d'erreur grave. Le questionnaire en annexe 1 classe d'abord les bassins suivant le type d'averse dominant, la superficie et le caractère plus ou moins dégradé du réseau hydrographique ; puis il permet de spécifier si le bassin présente une particularité spécifique concernant sa forme, le réseau hydrographique, la pente, la répartition des surfaces perméables ou imperméables, la nature de la dégradation hydrographique, la végétation, les cultures et enfin les structures artificielles.

Dans le cas présent, la première classification joue assez rarement, seule la bande littorale du Sénégal et de la Mauritanie échappe au cas général des types d'averses décrits plus haut, mais pour les bassins situés dans cette bande il n'existe pas pour le moment d'études systématiques des formes d'averses aussi poussées que pour l'intérieur du continent. Les hauteurs de précipitations décennales sont données sur les cartes du CIEH des pluies décennales. Le corps d'averse dure beaucoup plus longtemps et il semble que les intensités maximales ne croissent pas comme les hauteurs journalières lorsque l'on se rapproche de la côte. En outre la probabilité de plusieurs corps d'averses importantes dans la pluie journalière décennale est assez élevée. Dans ces conditions les valeurs de K_r extrapolées à partir de K_r100 et la valeur 2.6 de α doivent être

surestimées. Dès que l'on aura déterminé P10 on procédera comme si le bassin était à l'intérieur des terres, mais il est à peu près certain que les valeurs de Q_{max10} obtenues seront surestimées. On espère que dans l'avenir une étude des intensités et formes d'averses aussi fine qu'à Niamey permettra de serrer de plus près la valeur du débit décennal.

Si la superficie ne dépasse pas 10-12 Km², on pourra utiliser la méthodologie proposée en 9.3 (cas 2a du questionnaire) sauf lorsque I_{gcor} est inférieur à 7 et S supérieur à 5-6 Km² et I_{gcor} est inférieur ou égal à 3 m/Km pour S inférieur à 12 Km² ; dans ces deux cas la crue décennale est unitaire et on considérera le temps Tb_1 (voir relation en 7.2.) au lieu de Tb_2 et une valeur de α égale à 2,5 (cas 2b du questionnaire).

Dans le cas de S voisin de 1 Km² avec une pente de 60m/Km ce n'est plus la pluie journalière qui conduit au débit de pointe maximal mais une tranche d'intensité de 15' décennale ou de 30' décennale. Dans ce cas, en terrain imperméable, le véritable débit "décennal" sera obtenu en majorant de 15% le débit décennal calculé comme on le montrera ultérieurement à partir de la pluie journalière décennale mais le volume de ruissellement correspondant à la véritable pointe de crue décennale sera de 30% inférieur au véritable volume décennal produit par la pluie journalière décennale. En terrain perméable la majoration de la pointe de crue ne sera que de 10% dans les zones les plus humides du Sahel. Pour une superficie de 5 Km² la majoration passe de 8% en terrain imperméable à 2% en terrain perméable vers le Sud du Sahel. Pour une superficie de 10 Km² la majoration, de 5% en terrain imperméable est nulle en terrain perméable.

Une pente de 25m/Km et moins c'est la pluie journalière qui conduit à l'averse décennale, les tranches décennales de 15' et 30' conduisant à des débits de pointe nettement inférieurs.

Il faut examiner ensuite la forme du bassin et l'organisation du réseau. Si le bassin est plus long que la moyenne (I comp supérieur à 1,30) on devra majorer le temps de base Tb_2 . Si le réseau hydrographique est radial (tributaire en éventail) on devra augmenter le coefficient de pointe α . S'il est en arête de poisson, surtout avec les tributaires d'un seul côté (réseau en arête déporté ou unilatéral) le coefficient de pointe devra être réduit.

Mais auparavant il conviendra de considérer les types de sol et vérifier s'il convient ou non d'employer un bassin réduit aux surfaces les moins perméables (cas 3a.3a). Cette opération ne doit pas être effectuée dans le seul cas où les sols les plus perméables ne donnent lieu à aucun écoulement mais il faut que la différence de perméabilité soit grande. Dans ces conditions l'erreur faite en négligeant ce faible écoulement est bien inférieure à celle qui serait faite en considérant un bassin homogène sur toute la surface surtout lorsque les parties imperméables

sont à l'aval ; dans ces conditions les apports des parties plus perméables arrivent au point de contrôle en fin de crue et sont sans effet sur le débit de pointe. Ceci n'est pas exact bien entendu lorsque les parties imperméables ne couvrent que 5% de la superficie totale par exemple.

On doit considérer également le cas de rupture de pente et la présence de lacs ou de marécages.

Les cultures sur les versants augmentent l'infiltrabilité en freinant l'écoulement en nappe et en gênant la formation de pellicule imperméable, il faudra en tenir compte dans les pourcentages de superficie de différentes infiltrabilités. Dans les fonds de vallées, ce serait le contraire, les zones cultivées offrant moins de résistance à l'écoulement dans le lit majeur qu'une végétation arbustive relativement dense. De telles cultures ne sont pas très fréquentes dans des bassins aussi petits mais lorsqu'elles existent, elles compensent l'effet d'amortissement de l'augmentation du lit majeur, premier stade de la dégénération hydrographique dont il sera question plus loin.

La présence d'ouvrages si simples soient-ils altérant les conditions de l'écoulement doit faire l'objet, au moins, d'estimations sommaires de leur influence sur l'écoulement ; à la limite, on s'approche du cas de l'hydrologie urbaine pour laquelle la fonction de production des écoulements correspondant à la lame ruisselée ne représente qu'une partie de l'étude, la masse de calculs hydrauliques pour déterminer les conditions de transfert de l'écoulement étant souvent plus importante.

On en arrive alors au problème de dégradation hydrographique qui, heureusement ne se produit pas trop souvent de façon grave sur de si petits bassins. Si elle est seulement marquée par un lit majeur de largeur significative (premier stade de la dégradation) le débit trouvé dans l'hypothèse d'une dégradation nulle devrait être réduit dans des proportions qui peuvent aller jusqu'à 50 % si le lit majeur est très large, mais nous ne sommes pas en mesure pour le moment de donner des règles générales pour estimer le coefficient de réduction ; il faudrait d'ailleurs donner d'abord des normes précises pour définir un lit majeur "significatif" ou très large. La correction est très probablement bien inférieure à 50 % si le lit majeur n'est pas trop boisé et si le lit mineur reste assez bien marqué. Dans ce cas, il serait préférable de ne pas tenir compte de la dégradation ou de ne pas admettre de réduction dépassant 20 à 30 %. Il y a le cas où le lit mineur disparaît remplacé par une série de petites mares. Enfin, la dégradation peut être beaucoup plus forte avec arrêt de tous les écoulements dans une mare, il convient alors de vérifier si le seuil bornant cette mare ne peut pas être submergé en période de crue décennale, avant d'affirmer que le débit décennal est nul ; on a vu un certain nombre d'exemples de seuil de ce genre laissant passer des débits non négligeables, quelques mètres cubes par seconde par exemple pour un bassin couvrant 10 km². Pour ces bassins contrôlant 10 km² on ne risque guère de rencontrer d'autres types de dégradation plus complexes.

9.3. Evaluation des précipitations décennales :

Nous recommandons de déterminer la pluie journalière décennale ponctuelle sur les cartes du CIEH, en particulier celles de la note de synthèse. Ces cartes sont très pratiques, il est facile d'obtenir P10 par interpolation linéaire connaissant la longitude et la latitude du bassin versant.

Pour passer à la précipitation moyenne sur le bassin $\overline{P10}$, on multiplie P10 par le coefficient d'abattement K déterminé par l'équation simplifiée de VUILLAUME (1974) pour la pluie décennale :

$$K = 1 - (9 - 42 \cdot 10^{-3} \cdot P + 152) \cdot 10^{-3} \cdot \log S$$

S = superficie du bassin en km²

P = hauteur moyenne de précipitation annuelle en mm.

On peut aussi utiliser la figure 10 ci-jointe pour obtenir P₁₀.

9.4. Evaluation du volume ruisselé :

Il convient de déterminer le coefficient de ruissellement Kr10 sur les figures 1 et 2 en fonction de S, de I_{gcor}, de l'infiltrabilité, et de la pluie décennale. Ces réseaux de courbes sont valables dans les conditions climatiques correspondant à des pluies décennales ponctuelles de 100 mm et 70 mm. Les valeurs d'infiltrabilité et de pente sont décrites au paragraphe 9.1.

Pour l'infiltrabilité, en l'absence du répertoire des aptitudes au ruissellement des couches superficielles des sols, on pourra être amené dans certains cas à considérer des conditions intermédiaires, par exemple, des conditions donnant des résultats correspondant à la moyenne de ceux des bassins Imp et Rimp. Nous serons donc amenés, en général, à procéder à trois interpolations pour les trois paramètres, autres que la surface. Un abaque serait beaucoup plus facile à utiliser que ce que nous allons proposer ci-après, mais il est impossible de donner des valeurs quantitatives variant de façon continue au paramètre représentant l'infiltrabilité. Comme c'est ce paramètre qui a la plus forte influence, il est préférable pour le moment, de s'en tenir à la méthode proposée ci-après.

Après classement du bassin complet ou du bassin réduit dans une catégorie d'infiltrabilité et détermination des trois autres paramètres, on considère la valeur de I_{gcor} supérieure à la valeur trouvée ; d'après la figure 1 et la valeur de S, on détermine une première valeur de Kr10, notée Kr10-1, par interpolation entre les valeurs de Kr10 données pour les deux symboles d'infiltrabilité qui encadrent les conditions d'infiltrabilité du bassin. On fait exactement la même chose pour la valeur de I_{gcor} inférieure à la valeur trouvée et on obtient une valeur Kr10.2.

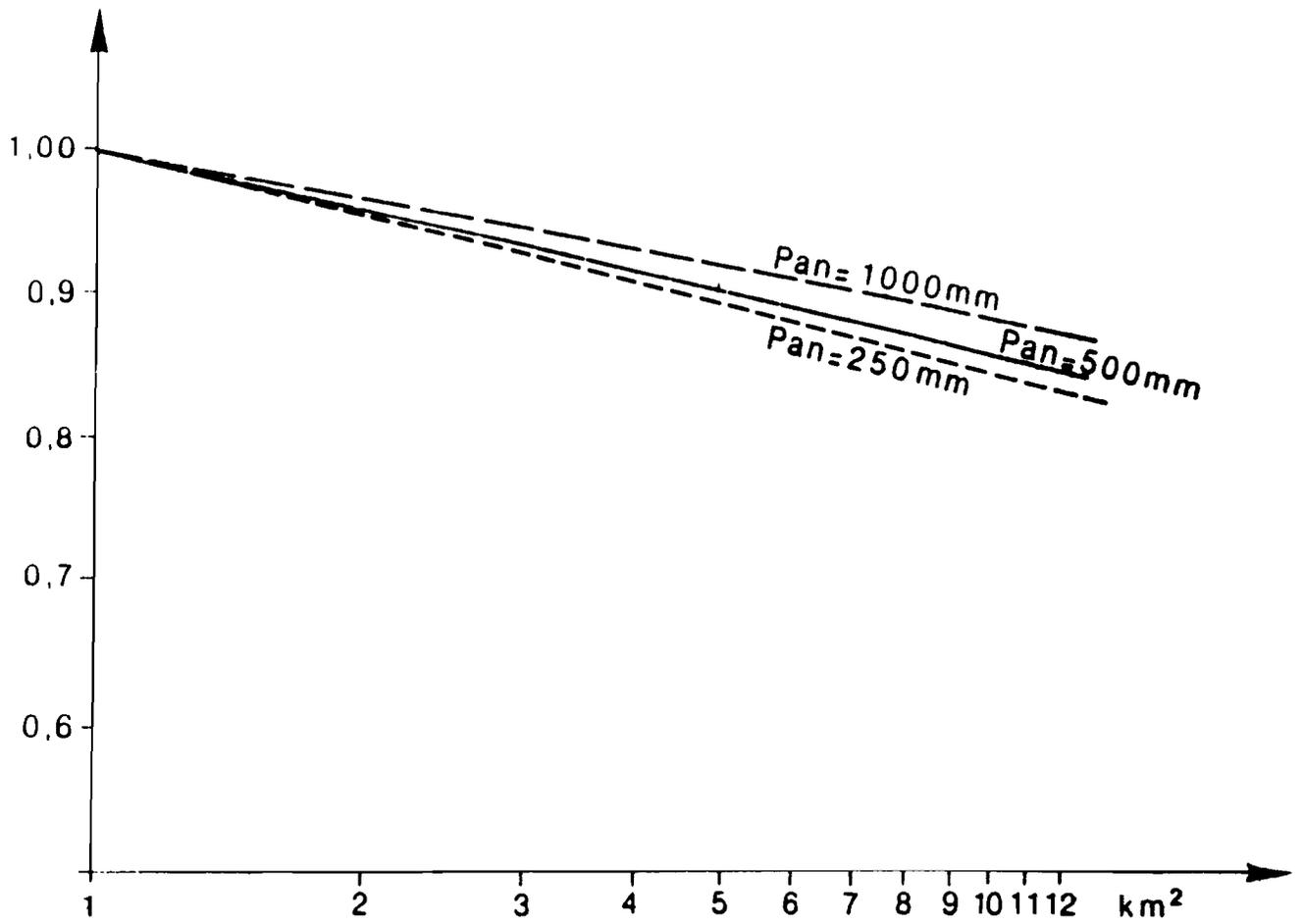


Fig. 10-Coefficient d'abattement pour la pluie décennale au Sahel en fonction de la surface S (d'après G.Vuillaume 1974)

On trouve par interpolation linéaire entre Kr10.1 et Kr10.2 la valeur Kr10.3 correspondant exactement à l'indice I_{gcor} du bassin et à des conditions climatiques correspondant à une pluie journalière décennale de 100 mm.

On obtient une seconde valeur Kr10.3 en opérant de même avec les valeurs de Kr de la figure 2 (pluie journalière décennale de 70 mm).

On interpole alors entre les deux valeurs de Kr10.3 en fonction de la précipitation ponctuelle P10 trouvée en 9.3. (les courbes Kr tiennent compte de l'abattement) et on obtient la valeur Kr10 cherchée.

La valeur de la lame ruisselée décennale est donc : $Hr_{10} = K \cdot P_{10} \cdot Kr_{10}$.

9.5. Evaluation du débit maximum décennal de ruissellement

On détermine le débit de base Tb2 en utilisant les relations données en 8.3. ou la figure 7 déterminant Tb2 à partir de la surface S de l'indice de pente I_{gcor} et de l'infiltrabilité.

Là aussi il conviendra d'interpoler pour obtenir la valeur précise de Tb2 entre les valeurs de I_{gcor} encadrant celle trouvée pour le bassin étudié.

Si le bassin a une pente telle que l'averse décennale est unitaire (voir en 9.2. I_{gcor} inférieur à 7 m/km-1) on se reportera aux relations données en 7.2. pour calculer Tb1.

Si le bassin est anormalement allongé avec I_{comp} supérieur à 1,30 on devra affecter Tb2 trouvé comme il a été indiqué plus haut d'une majoration ; à titre d'exemple pour Mogodé (I_{comp} = 1,42) la majoration de Tb2 serait de 30 %, pour Kourien-Doulien (I_{comp} = 1,54) la majoration serait de 60 %. A noter que par rapport à un bassin compact avec I_{comp} = 1,15 par exemple la majoration de la longueur du tributaire principal est de 80 % dans le premier cas et de 200 % dans le second. En fait, c'est Tb1 qui devrait être majoré, avec des coefficients plus élevés bien entendu, mais cela compliquerait le calcul de la correction pour une augmentation illusoire de la précision.

Le volume ruisselé est le produit de la lame ruisselée Hr10 par la superficie du bassin.

$$Vr (m^3) = 1000 S (km^2) \times Hr_{10} (mm)$$

La valeur de Tb_2 étant connue, on doit déterminer le débit moyen de ruissellement Q_r qui est en m^3/s le quotient du volume ruisselé en m^3 par Tb_2 en secondes.

$$Q_r = V_r / Tb_2$$

Le débit maximum ruisselé Q_{maxr} est le produit de Q_r par le coefficient de pointe α . Celui-ci a été admis comme constant et égal à 2,6 pour ces très petits bassins (voir 8.4 valeur de α_p). Nous ignorons la valeur du coefficient qui sera proposée pour des bassins versants couvrant plus de $10 km^2$; dans le cas où on conserve la même méthodologie, nous proposons en attendant d'adopter pour les bassins à faible pente également une valeur de 2.6 légèrement conservative par rapport à la valeur médiane de 2.5 trouvée pour les hydrogrammes instantanés.

Ce coefficient de pointe devra être corrigé suivant les indications du questionnaire d'après les dispositions du réseau hydrographique et dans le cas de rugosité très forte du bassin (amas de blocs). Pour un réseau hydrographique fortement radial comme sur le Mayo Leleng, on trouve $\alpha = 3$. Dans le cas de réseau en arête déporté très unilatéral comme à Tchaloï, on trouve $\alpha = 1,9$. Si cette disposition est peu marquée comme pour Taraiman, on trouve $\alpha = 2,4$. On trouverait probablement des valeurs voisines de 2,3 ou 2,4 pour des réseaux en arête. La symétrie en multipliant le nombre de tributaires augmente les chances de voir les pointes successives se fondre en une pointe unique.

Le débit maximum décennal de ruissellement calculé dans ces conditions est très proche du débit maximum : la part de l'écoulement retardé et de l'écoulement de base ne dépasse pas 7 % de ce débit de pointe dans tous les cas observés et varie plus généralement entre 2 et 4 % avec des valeurs inférieures ou égales à 1 % pour des terrains très imperméables. Heureusement cette valeur est faible car il est délicat de donner des directives générales, la transposition des débits de base est une des opérations les plus difficiles qui soient.

La valeur de ce débit à ajouter au débit décennal dépend, non de l'infiltrabilité moyenne, mais des dispositions du bassin, de la proportion de terrains perméables, et des possibilités qu'ont ces sols de restituer de l'eau au bassin ; certains sols perméables, les sables de Niamey, par exemple, absorbent tout et restituent peu, les amas de blocs comme ceux de Koleï peuvent ne donner qu'un faible écoulement retardé.

En conséquence, on majorera le débit décennal de ruissellement du débit d'écoulement retardé Q_{ret} soit 6 % s'il y a des terrains perméables et 3 % en terrain imperméable (avec moins de 10 % de terrains perméables). En général, ces majorations sont un peu fortes mais une erreur de 2 % sur le débit de pointe est négligeable.

9.6. Volume et forme de la crue décennale

9.6.1 Volume de la crue

On ne cherchera pas à déterminer le volume total de la crue, ce qui nécessiterait de bien connaître l'écoulement de base alors que dans le calcul des ouvrages ce qu'il importe de connaître c'est le volume écoulé jusqu'à la fin du temps de base. Ce volume sera nettement inférieur au volume V_e calculé dans les divers rapports ORSTOM pour lequel en principe l'hydrogramme est construit jusqu'à l'arrêt total de l'écoulement.

On obtient ce volume de crue V_c en ajoutant à V_r un volume V_{ret} égal à la majoration pour écoulement retardé Q_{ret} estimée plus haut, multipliée par le temps de base T_{b2} (Q_{ret} est la moitié de l'écoulement retardé à la fin du temps de base)

$$V_{ret} = Q_{ret} \times T_{b2}$$

Pour le Mayo Leleng par exemple :

$$V_r = 128360 \text{ m}^3$$

$$T_{b2} = 120 \text{ minutes}$$

$$Q_{ret} = 3 \text{ m}^3/\text{s} \text{ donc } V_{ret} = 21600 \text{ m}^3$$

$$V_c = 150000 \text{ m}^3 \text{ soit } 1,17 V_r.$$

C'est une des plus fortes majorations de V_r parmi les bassins observés. Dans le cas de bassins réduits on obtiendra souvent des valeurs de V_c légèrement sous-estimées.

9.6.2. Forme de la crue :

Cette forme peut être déterminée à partir des éléments suivants : temps de base T_{b2} , temps de montée T_{m2} , débit maximum décennal, volume de la crue, et coefficient de pointe.

Rappelons que plus α est grand plus la pointe est aigüe.

Le temps de montée T_{m2} est donné par une série de régressions en 8.2. et par la figure 6.

9.7. Exemple de calcul :

Considérons un bassin versant de 7 km², avec un indice de pente corrigé de 20 m/km et comportant environ 25 % de sols assez perméables et 75 % de sols imperméables, les sols perméables étant répartis de façon assez aléatoire, donc il n'y a pas lieu de considérer un bassin réduit (le bassin peut être classé à 25 % en dessous de Imp. dans l'intervalle Imp. RImp.). La pluie annuelle est de 550 mm.

Après consultation du questionnaire le bassin ne présente aucune particularité conduisant à modifier les valeurs de Tb ou du coefficient de pointe α ni à procéder à aucune correction complémentaire.

On détermine P_{10} d'après la latitude et la longitude sur la carte CIEH. $P_{10} = 88$ mm.

Le coefficient d'abattement K est donné par la figure 10.

$$K = 0,88 \quad \overline{P_{10}} = 88 \times 0,88 = 77,44 \text{ mm.}$$

Sur la figure 1 : ($P_{10} = 100$ mm et $S = 7$ km²)

pour sols Imp. et $I_{g_{cor}} = 25$ m/km $K_r = 67,7$ %

$$K_{r_{10.1}} = 67,7 - \frac{31,5}{4} = 59,8 \%$$

pour sols RImp. et $I_{g_{cor}} = 25$ m/km $K_r = 36,2$ %

pour sols Imp. et $I_{g_{cor}} = 15$ m/km $K_r = 61,8$ %

$$K_{r_{10.2}} = 61,8 - \frac{31,8}{4} = 53,8 \%$$

pour sols RImp. et $I_{g_{cor}} = 15$ m/km $K_r = 30,0$ %

$$K_{r_{10.3}} = 59,8 - \frac{6,0}{2} = 56,8 \%$$

Sur la figure 2 : $P_{10} = 70$ mm et $S = 7$ km²

pour sols Imp. et $I_{g_{cor}} = 25$ m/km $K_r = 62,5$ %

$$K_{r_{10.1}} = 62,5 - \frac{29,2}{4} = 55,2 \%$$

pour sols RImp. et $I_{g_{cor}} = 25$ m/km $K_r = 33,2$ %

pour sols Imp. et $lg_{cor} = 15 \text{ m/km}$ $Kr = 55,4 \%$

$$Kr_{10.2} = 55,4 - \frac{27,2}{4} = 48,6 \%$$

pour sols RImp. et $lg_{cor} = 15 \text{ m/km}$ $Kr = 28,0 \%$

$$Kr_{10.3} = 55,7 - \frac{6,6}{2} = 52,4 \%$$

Il n'y a pas lieu de regarder de trop près les différences entre les valeurs de Kr_{10_1} et Kr_{10_2} pour $P_{10} = 100$ et $P_{10} = 70 \text{ mm}$ toutes les courbes étant tracées à 2 % près.

$$\text{pour } P_{10} = 88 \text{ mm } Kr_{10} \text{ est égal à } 56,8 - (56,8 - 52,4) \cdot \frac{12}{30} = 55 \%$$

$$Hr = \overline{P_{10}} \cdot 0,55 = 77,44 \cdot 0,55 = 42,59 \text{ mm}$$

$$Vr = 7 \cdot 10^3 \cdot 42,59 = 298130 \text{ m}^3$$

Sur la figure 7 : Tb_2 déterminé pour sol Imp. et $S = \text{km}^2$

pour $lg = 25 \text{ m/km}$ Tb_2 est égal à 145 mn

pour $lg = 15 \text{ m/km}$ Tb_2 est égal à 174 mn

$$\text{pour } lg = 20 \text{ m/km } Tb_2 = \frac{145 + 174}{2} = 160 \text{ mn} = 9600 \text{ s}$$

Le débit moyen de ruissellement

$$M = \frac{298130}{9600} = 31,06 \text{ m}^3/\text{s}$$

Avec le coefficient $\alpha = 2,6$

$$Q_{maxr} = 31,06 \cdot 2,6 = 80,76 \text{ m}^3/\text{s}$$

La part d'écoulement retardé à ajouter est de 6 % après examen des terrains perméables qui sont de nature à restituer un débit non négligeable. $Q_{max} = 80,76 + 4,85 = 85,6 \text{ m}^3/\text{s}$.

Le volume $V_{ret} = 4,85 \times 9600 = 46560 \text{ m}^3$

Sur la figure 6 :

Le temps de montée T_{m2} est égal à 40,9 mn pour $I_{g_{cor}} = 25$ m/km
et T_{m2} est égal à 52,4 mn pour $I_{g_{cor}} = 15$ m/km

Donc $T_{m2} = 47$ mn pour $I_{g_{cor}} = 20$ m/km.

On dispose donc de tous les éléments essentiels de la crue décennale.

9.8. Autres possibilités d'estimation des débits de crues décennales

Pour vérifier si le coefficient de pointe α ne risquait pas d'atteindre des valeurs élevées pour des conditions particulières de pente, de perméabilité des sols, ou de régime pluviométrique, nous avons procédé pour une série assez complète de bassins fictifs au calcul des débits maximum de crue décennale. On en trouvera les résultats dans des tableaux en annexe 2. Ces débits sont peut-être très légèrement surestimés, la tranche maximale d'intensité des hyétogrammes types utilisée est peut-être un peu forte car nous ne voulions pas risquer de réduire artificiellement le coefficient de pointe par une intensité maximale trop faible. Or, si on ne prend pas des précautions dans l'utilisation des pluviographes qui n'ont probablement pas été toujours respectées à Ouagadougou et à Niamey, on obtient des valeurs trop faibles pour les fortes intensités. D'autre part ainsi que nous l'avons indiqué plus haut au cours des diverses opérations de calcul, nous avons pu introduire systématiquement des biais.

Ceci est largement compensé, pensons-nous, par l'élimination des conséquences des valeurs particulières des facteurs de crues secondaires et de l'influence de certains étalonnages hasardeux.

En outre, les bassins perméables sont quantitativement représentés de façon correcte dans cette série ce qui n'est vraiment pas le cas pour les séries observées. Il est possible de déduire de cette série de valeurs des régressions multiples avec les facteurs principaux à condition de mettre un indice quantitatif pour représenter l'infiltrabilité derrière "Bassin Imp ou RImp, etc.) ce qui sans le répertoire d'aptitude au ruissellement des sols n'est pas facile. On arriverait ainsi à une méthodologie plus simple. Mais celle-ci ne dispenserait ni de la lecture du questionnaire, ni d'un examen du bassin versant, si on veut éviter toute erreur pouvant atteindre et même dépasser 100 % ; un hydrologue peut plus facilement déceler un aspect dangereux d'un bassin dans la démarche "pas à pas" décrite tout au long de ce paragraphe 9.

CONCLUSION

Au cours de cette étude, nous nous sommes efforcés d'utiliser la totalité de l'information disponible. Certains bassins même étudiés sommairement fournissent des renseignements précieux qu'il serait dommage d'éliminer a priori.

Pour l'objectif d'application pratique qui nous était fixé nous nous sommes libérés plus ou moins d'un certain nombre d'hypothèses simplificatrices parfois un peu abusives. Grâce aux études pluviométriques récentes, nous avons pu passer de la base de calcul fournie par la pluie journalière décennale à l'averse principale de cette pluie journalière avec un hyétogramme type bien défini et nous avons admis une averse préliminaire, une traîne d'intensité assez longue et une averse secondaire de faible importance, ce qui est plus conforme à tout ce qui a été observé.

De même, nous avons pu pour les plus petits bassins nous aventurer dans les domaines où la crue décennale ne résulte plus d'un corps d'averse décennal (qui dans ces régions tropicales arides correspond à peu près à une pluie journalière décennale) mais d'une tranche d'averse de courte durée de fréquence décennale et nous avons constaté que pour des superficies supérieures à 1 km² la majoration du débit de crue décennale qui en découle n'est pas très élevée. Nous nous sommes assez nettement éloignés du cas de bassins à sol homogène et le questionnaire nous a aidé à tenir compte d'un bon nombre de facteurs de l'écoulement. Malheureusement pour le facteur principal du ruissellement, l'infiltrabilité, nous avons peu progressé par rapport à ce qui avait été fait en 1965. Ce problème sera résolu en grande partie lorsque le répertoire dont il a été question plus haut sera au point.

Au cours de cette étude à caractère pratique nous sommes arrivés à certains résultats qui ne sont pas dépourvus d'intérêt pour la recherche. Malgré la prise en compte de la pluie au sol les coefficients de ruissellement que l'on peut escompter pour une forte averse sur un bassin réputé imperméable ne sont pas plus élevés que ceux que l'on prévoyait autrefois.

Des progrès ont été enregistrés dans la connaissance des formes de l'hydrogramme unitaire et par conséquent, des hydrogrammes en général.

Une analyse plus rigoureuse du temps de base, la prise en compte des pentes transversales dans l'indice global et l'analyse des facteurs dits secondaires, a permis de mieux caractériser l'influence des facteurs pente et surface sur les variations de ce temps de base pour l'hydrogramme unitaire et pour celui de l'hydrogramme de l'averse décennale. Un point important est la rupture de la courbe de variation du temps de base entre 20 et 14 m/km. Il décroît très rapidement lorsque lg

croît au-delà de ces pentes, ce qui correspond à une rapide croissance du ruissellement superficiel.

On a pu chiffrer, dans une certaine mesure l'influence de la forme du bassin sur le temps de base.

Le coefficient de pointe qui permet de quantifier tant bien que mal le caractère plus ou moins aigu de l'hydrogramme est assez stable et ne varie pratiquement pas avec la superficie, la pente et la perméabilité du bassin tout au moins pour des surfaces comprises entre 1 et 20 km². Par contre, il est sensible à la disposition du réseau hydrographique, à l'hétérogénéité du bassin et à sa rugosité ; nous avons montré autrefois que dans les zones humides, en forêt en particulier, il était sensible à la couverture végétale. On a abouti ainsi, par une voie empirique, à des conclusions proches de celles de MONIOD (1983) qui a suivi une approche rigoureuse.

Ce sont à ces particularités qu'on doit imputer les valeurs élevées de α trouvées dans certains cas et parfois aussi à une séparation peu rigoureuse entre le ruissellement et les autres formes de l'écoulement, conduisant à des temps de base de durée exagérée.

On a pu ainsi préciser pour ces très petits bassins versants du Sahel l'influence des divers facteurs y compris la forme du bassin et la nature du réseau bien explicitée par DUBREUIL (1986) qui les avait déjà mis en évidence depuis bien longtemps.

Mais ceci ne sera complet, nous le répétons, que lorsque nous aurons pu systématiquement étudier l'infiltrabilité des divers types de sols du Sahel grâce aux recherches de A. CASENAVE et de son équipe sur le ruissellement avec l'aide du minisimulateur.

On a pu enfin mieux apprécier la tâche qui restait à accomplir sur les bassins de l'Afrique Occidentale et Centrale.

Ce qui précède ne concerne que les très petits bassins du Sahel. Au-delà de 10 km² dans les régions sahéliennes la dégradation hydrographique posera parfois de sérieux problèmes ; au stade de l'analyse l'influence du déplacement de l'averse sur le bassin rendra plus difficile l'étude des temps de base et des temps de montée ; au-delà de 100-200 km² l'hydrogramme unitaire ne pourra plus être utilisé.

Dans les zones plus humides, les études de 1965 ont supposé que l'on pouvait traiter l'écoulement retardé comme on traitait le ruissellement. En outre, on a continué, en toute connaissance de cause, à prendre la hauteur de l'averse comme facteur principal alors que l'influence de l'humidité antérieure du sol était parfois aussi significative. Enfin, seules deux

formes de couvertures végétales, la savane plus ou moins arbustive et la forêt ont été considérées.

L'utilisation des sols en particulier le type de culture n'a pas été pris en compte : on voit que le plus difficile reste à faire pour améliorer sérieusement les méthodes de transposition des données relatives aux fortes crues.

BIBLIOGRAPHIE

ALBERGEL (J.), VALENTIN (C.), (1986)

"Sahélisation d'un petit bassin versant Soudanien, Kognere Boulsa au BURKINA FASO".
Colloque Nordeste-Sahel. IHEAL. Université Paris III, 14 p.

ALBERGEL (J), (1986)

"Evolution de la pluviométrie en Afrique Soudano-Sahélienne. Exemple du BURKINA FASO".
Colloque International sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la
sécheresse CIEH OUAGADOUGOU, 17 p.

AUVRAY (C.), (1962)

"Estimation de débits de crues en régimes tropicaux". CIEH, présenté à la conférence de
MONROVIA, 50 p.

BOUVIER (C), (1985).

"Etude de ruissellement urbain à Niamey". Rapport général. Tome 3 : Interprétation des
données. CIEH, Mission ORSTOM au NIGER. 106 p.

BRUNET-MORET (Y), (1963 à 1968).

"Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique Occidentale". Rapport multigraph. CIEH,
ORSTOM. PARIS.

République de Haute Volta (1963) ,19 p.

République du Niger (1963) ,18 p.

République du Mali (1963), 23 p.

République du Sénégal (1963), 18 p.

République de Mauritanie (1964), 23 p.

République du Tchad (1966), 27 p.

Rapport de synthèse (1968), 17 p.

CASENAVE (A.), (1982).

"Le minisimulateur de pluie : conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des
mesures". Cahiers ORSTOM. Série Hydrol. vol. XIX n° 4, pp. 208-227. PARIS.

CHEVALLIER (P.), CLAUDE (J.), POUYAUD (B.) et BERNARD (A.), (1985)

"Pluies et crues au SAHEL. Hydrologie de la Mare d'Oursi (1976-1981)". Travaux et Documents
n° 190. ORSTOM PARIS, 251 p.

COLLINET (J.), VALENTIN (C.), ASSELINE (J.), HOEPPFNER (M.) et al., (1980)

"Etude lat./03. Ruissellement, infiltration et érosion en zones sahéliennes et subdésertiques. Rapport de terrain (Galmi Agades)". Multigraph. ORSTOM, 36 p.

DUBREUIL (P) (1965)

"Contribution à l'étude d'implantation de bassins représentatifs de régions hydrologiques homogènes". Colloque AISH. Bassins représentatifs et expérimentaux. BUDAPEST, pp. 54-63. Publication AISH n° 66.

DUBREUIL (P.), (1966)

"Les caractères physiques et morphologiques des bassins versants. Leur détermination avec une précision acceptable". Cahier ORSTOM. Série Hydrol. Vol. II.

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.

DUBREUIL (P), VUILLAUME (G) (1975)

"Influence du milieu physico-climatique sur l'écoulement de petits bassins intertropicaux. Les caractéristiques hydrologiques des bassins fluviaux". Colloque AISH. TOKYO, pp. 205-215. Publication AISH n° 117.

DUBREUIL (P) (1986)

"Review of relationships between geophysical factors and hydrological characteristics in the tropics". Journal of Hydrology 87, pp. 201-222.

GIRARD (G) (1975a)

"Application du modèle à discrétion spatiale au bassin versant de l'oued Ghorfa (Mauritanie)." Cahier ORSTOM. Série Hydrol. Vol. XII n° 3, pp.167-188.

GIRARD (G) (1975b)

"Les modèles hydrologiques pour l'évaluation de la lame écoulée en zone Sahélienne et leurs contraintes." Cahier ORSTOM. Série hydrol. Vol XII n° 3, pp. 129-221.

IBIZA (D) (1985)

"Point de vue sur les fonctions de production". Cahier ORSTOM. Série hydrol. Vol. XXI n°3, pp. 5-16.

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". Cahier ORSTOM. Série hydrol. Vol. XIX n° 3, pp.135-204.

MONIOD (F) (1983)

"Deux paramètres pour caractériser le réseau hydrographique." Cahier ORSTOM Série hydrol. Vol. XX n° 3-4, pp. 191-203.

OLIVRY (J.C.) (1986)

"Fleuves et rivières du Cameroun." Monographie hydrologique n° 9 MESRES ORSTOM PARIS.

PUECH (C), CHABI GONNI (D) (1983)

"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

ROCHE (M) (1963)

"Hydrologie de surface". Gauthier-Villars PARIS, 429 p.

RODIER (J.A.) (1964)

"Régimes hydrologiques de l'Afrique Noire à l'Ouest du Congo." Mémoires n° 6, 137 p. ORSTOM PARIS.

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. 30 p., PARIS. (Translated in english by W.E. Herridge (1965) multigraph CIEH. OUAGADOUGOU).

RODIER (J.A) (1982)

"La transposition des résultats des bassins représentatifs et ses problèmes". Cahier ORSTOM. Série hydrol. Vol.XIX, n° 2, pp.115-127.

RODIER (J.A.) (1984)

"Evaluations hydrométéorologiques des critères de conception des ouvrages de drainages routiers et des évacuateurs de crues des petits barrages dans la région du Sahel." Rapport inédit. Projet UNSO/RAF/83/504. GENEVE, 43 p.

RODIER (J.A.) (1986)

"Caractéristiques des crues des petits bassins versants représentatifs au Sahel." Cahier ORSTOM. Série hydrol. Vol. XXI n° 2, 25 p. + annexes.

RODIER (J.A.), RIBSTEIN (P) (1986)

"Utilisation des bassins représentatifs pour la prédétermination des crues et l'estimation des apports au Sahel." Colloque International sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse CIEH OUAGADOUGOU, 47 p.

VALENTIN (C) (1985)

"Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de régions subdésertiques (Agades-République du Niger). Dynamique de formation et conséquence sur l'économie en eau". Collection Etudes et Thèses - ORSTOM PARIS, 259 p.

VUILLAUME (G) (1974)

"L'abattement des précipitations journalières en Afrique intertropicale. Variabilité et précision de calcul." Cahier ORSTOM. Série hydrol. Vol. XI n° 3, pp. 205-240.

ANNEXE 1

LES POINTS DELICATS A EXAMINER (CHECK-LIST)

Les points délicats à examiner (check-list)

Les erreurs d'estimation des débits de crues décennales peuvent être très élevées. Une bonne partie provient d'une mauvaise estimation des conditions d'aptitude au ruissellement des couches superficielles des sols ; le répertoire dont il a été question plus haut est prévu pour y remédier. Mais une autre partie provient de caractéristiques physiques pas très usuelles pour le cadre géographique choisi ou de conditions d'écoulement s'écartant par trop des processus classiques (dégradation hydrographique par exemple).

Ceci est valable quelle que soit la méthodologie de calcul : qu'on utilise un modèle déterministe (méthode ORSTOM) pour procéder à la transposition des données d'un bassin connu à un bassin n'ayant jamais fait l'objet de mesures, ou qu'on emploie des régressions multiples (méthode CIEH). Dans les deux cas, il est impossible de tenir compte de tous les facteurs de l'écoulement d'où des erreurs notables lorsque des facteurs qui n'ont pas été pris en compte dans la méthodologie de calcul prennent des valeurs extrêmes.

On a observé d'autre part qu'il était plus sûr d'utiliser une méthodologie, quelle qu'elle soit, si le cadre géographique est assez bien défini. Donc un début de zonage peut également limiter les erreurs. Le fait de ne considérer que le cas du SAHEL, par exemple, revient déjà à classer les bassins dans une certaine catégorie de climat (un peu large cependant) et dans une plus faible mesure de couverture végétale. Dans ce qui suit, on répartira encore les bassins en trois ensembles de catégories : suivant le type d'averse dominant, la superficie et certaines particularités du bassin. Dans chaque cas évoqué ci-dessous, on indique, soit la méthodologie la mieux adaptée pour le moment, soit les précautions à prendre dans le cas d'application de telle ou telle méthodologie.

1. Classification selon le type d'averse dominant

- | | |
|--|---|
| <p><u>1a)</u> Le bassin est situé dans la bande de 10-20 km qui borde l'océan.</p> | <p>Les hyétogrammes de pluie à considérer sont beaucoup plus longs et plus complexes qu'à l'intérieur (P10 de l'ordre de 200 mm).</p> |
| <p><u>1b)</u> Le bassin est situé à l'intérieur des terres.</p> | <p>Voir les deux classifications suivantes.</p> |

2. Classification selon la superficie

- | | |
|--|--|
| <p><u>2a)</u> La superficie est inférieure à 10 km².</p> | <p>Utiliser la méthode ORSTOM en employant les diagrammes spécifiques à cette gamme de superficie.</p> |
| <p><u>2b)</u> La superficie est comprise entre 10 et 120 km².</p> | <p>Utiliser la méthode ORSTOM 1965 qui n'a pas encore été révisée pour cette gamme de superficie.</p> |
| <p><u>2c)</u> La superficie du bassin est comprise entre 100-120 et 200 km²</p> | <p>Théoriquement, on ne peut plus utiliser la méthode ORSTOM, mais on peut à la rigueur l'utiliser quand même en extrapolant les résultats de 100 à 200 km² ou utiliser la méthode CIEH.</p> |
| <p><u>2d)</u> La superficie du bassin est comprise entre 200 et 600 km².</p> | <p>La méthode CIEH est la seule à donner des résultats, mais elle n'est utilisable que pour des bassins versants ni trop perméables, ni trop imperméables avec une dégradation hydrographique modérée.</p> |

3. Classification selon certaines caractéristiques du bassin

3a) La dégradation hydrographique est nulle ou très faible.

Suivre une des méthodes proposées en 2, sous réserve de ce qui suit.

3ala) Le bassin est constitué de deux parties : amont et aval raccordées par un goulet d'étranglement.

Il faudra calculer séparément les hydrogrammes de crues des deux bassins partiels avec un décalage fonction de la distance de leur centre de gravité et de la pente du lit.

A titre indicatif, on trouve les résultats suivants :

S = surface du BV

V = vitesse de propagation

Q = débit

i = pente du lit

Au Mali, pour un lit très encombré par la végétation :

S = 30,4 km²

V = 0,6 m/s

Q = 200 m³/s

i = 3,5 m/km

Au Tchad, pour un lit beaucoup moins encombré :

S = 12,3 km²

V = 1,5 m/s

Q = 8,5 m³/s

i = 4 m/km

En Mauritanie :

S = 148 km²

V = 1,5 m/s

Q = 150 m³/s

i = 2,3 m/km

3alb) Sans en arriver au cas extrême 3ala, le réseau hydrographique montre deux ou plusieurs ensembles de cours d'eau laissant présager un décalage significatif de leurs apports (bassins allongés avec cours d'eau d'importances inégales).

Si on suit la méthodologie ORSTOM, il sera bon de prendre $\alpha < 2,6$ (voir 3alc).

Pour d'autres méthodologies, le débit maximal obtenu sera à réduire de Y % et le temps de base à majorer de Z %.

Y et Z ont été estimés à 30 % maximum sur des bassins observés.

3alc) Le réseau hydrographique est en arêtes de poissons avec tous les tributaires d'un seul côté.

Le coefficient α est à réduire
A titre indicatif :

$\alpha = 1.9$ avec arêtes de poisson absolument unilatérales

$\alpha = 2.4$ avec même disposition à peine marquée.

- 3ald) Le réseau, au contraire, présente un caractère très radial
- Prendre un coefficient $\alpha = 3$ ou majorer de 20 à 30 % le débit maximal obtenu avec des conditions moyennes.
- 3ale) Sans présenter les caractéristiques extrêmes du Jala, la forme du bassin est plus allongée (indice de compacité $I_{comp} > 1.30$).
- Si on suit la méthode ORSTOM majorer le temps de base de Z % du bassin ou réduire de de Y % le débit maximum obtenu pour des conditions moyennes.
A titre indicatif :
Y = 30 % pour $I_{comp} = 1.42$
Y = 60 % pour $I_{comp} = 1.54$
- 3alf) Le réseau présente une zone marécageuse à l'aval ou à l'amont du bassin.
- Voir 3a2a ou 3a2b ou 3a2c.
- 3a2) La forme et le réseau hydrographique ne présentent aucune des singularités plus haut.
- Suivre une des méthodologies proposées en 2, sous réserve de ce qui suit.
- 3a2a) Le bassin présente une rupture de pente très forte dans sa partie aval avec formation plaine d'inondation ou même d'un lac temporaire.
- T_m et T_b doivent être majorés de X % suivant l'importance de la zone à faible pente. Pour d'autres méthodologies, le débit maximal obtenu pour un cas sans rupture de pente est à réduire de Y %.
A titre indicatif :
Pour un bassin de 2,36 km², avec formation d'un marécage temporaire couvrant 5 % de la superficie, X serait de l'ordre de 50 % et Y de 30 %.
- 3a2b) La partie plate du bassin, très perméable sans trace de drainage, est à l'amont.
- Voir 3a3a.
- 3a2c) La partie plate du bassin imperméable et assez bien ou bien drainée, est à l'amont.
- Pas de changement par rapport aux méthodologies habituelles
- 3a2d) La partie plate du bassin, imperméable et mal drainée, est à l'amont.
- Voir 3b.
- 3a3a) Le bassin comporte une zone perméable à l'amont du tributaire principal ou des tributaires secondaires (sables éoliens, amas de blocs cris-
- Eliminer la superficie de ces zones de la surface S et faire tous les calculs sur la surface S' réduite. En toute rigueur, ceci est valable

- tallins, de gres ou de schistes, cuirasse ferrugineuse démantelée).
- 3a3b) Le bassin est couvert de blocs (forte rugosité) et cependant, il y a un certain ruissellement repérable par ses traces au sol.
- 3a4a) Zones cultivées dépassant plus de 20 % de la superficie.
- 3a4b) Abords du lit à l'aval couvert d'une végétation arbustive dense.
- 3a4c) Mesures de conservation des sols bien réalisées sur le terrain.
- 3a5a) Ecoulement perturbé par un ouvrage quelconque : le cas le plus courant est celui d'une piste recoupant le bassin.
- pour le calcul des crues et non pour le calcul de la lame écoulée annuelle.
- Les valeurs de T_m et T_b doivent être majorées de X %.
A titre indicatif :
X = 85 % pour un bassin versant de 1,05 km² couvert de roches décomposées en boule.
- Kr est en général plus faible pour cette zone que sur sol nu sauf si la mise en culture se fait sur des sols propices à la formation de pellicules (valable uniquement pour le Sahel). En zone plus humide, la mise en culture augmente généralement Kr sauf si de bonnes mesures de conservation du sol sont prises, ce qui est rare.
- Tant que cette végétation persiste, le débit maximum des crues pourrait être divisé par deux, mais cette sorte de végétation a si peu de chances de se maintenir, qu'il vaut mieux faire comme si elle n'existait pas pour le calcul des fortes crues.
- Les débits calculés par les processus habituels sont beaucoup trop forts tout au moins pour la fréquence décennale. Pour des fréquences plus faibles, cela n'est pas évident, les aménagements étant susceptibles de céder.
- Vérifier si sous la piste il existe une buse ou un pont, le débit maximum pouvant passer par ce pont. La piste peut être emportée ce qui risque de renforcer le débit maximum naturel, ou au contraire elle peut arrêter l'écoulement en toutes circonstances.

3b) Le bassin est l'objet de dégradation hydrographique.

3b1) Le bassin de moins de 50 à 80 km² est fortement dégradé à l'amont, pas de trace d'écoulement issu de cette zone. Partie aval S' non dégradée.

Procéder comme en 3a3a sur S' mais il serait bon de majorer les chiffres de 10 à 20 % pour tenir compte d'apports éventuels amont. Cette réduction de S à S' est risquée si la surface de cette zone dégradée est relativement importante.

3b2) Sur un bassin assez dégradé, un ou plusieurs bassins tributaires à l'extrémité aval ne le sont pas.

Faire le calcul uniquement sur ce ou ces bassins aval avec une légère majoration, se méfier des fréquences inférieures à la fréquence décennale.

3b3) La dégradation est limitée à une certaine portion des lits majeurs.

Réduire les valeurs trouvées par méthodes habituelles de X % suivant la longueur relative des lits majeurs dégradés.

A titre indicatif :
Sur un bassin de 87 km² avec un lit majeur très encombré par la végétation, X est de l'ordre de 70 %.

3b4) Bassin fortement dégradé.

D'après l'infiltrabilité des sols, les pentes et l'allure du réseau hydrographique sur photo aérienne, essayer de reconstituer qualitativement ce que pourrait être l'écoulement sur tout le bassin ; quant à passer au quantitatif, c'est très risqué même pour un hydrologue confirmé.

ANNEXE 2

TABLEAUX DES CARACTERISTIQUES DES HYDROGRAMMES COMPOSES SUR LES BASSINS FICTIFS

Symboles utilisés dans les tableaux de caractéristiques des hydrogrammes composés :

Ig60, Ig 25, etc. Indice global de pente calculé en principe comme indiqué par P. Dubreuil (Pente de la longueur du rectangle équivalent en m/km : 60 m/km, 25 m/km, après élimination des altitudes extrêmes) mais corrigé en fonction des pentes transversales si celles-ci sont significativement plus fortes que la pente longitudinale.

$I_{gcor.} = (IL + IT) / 2$

IL : première estimation des pentes longitudinales

IT : estimation des pentes transversales.

Imp. Bassin imperméable : 85 à 90 % au moins de la surface est constitué par des sols imperméables au moins en surface : rochers très sains et sans trop de rugosité, reg., glacis. Colluvions argileuses, argiles même avec fentes de retrait ; sols sablo-argileux, argilo-sableux ou même sableux avec pellicule superficielle imperméable et stable (P2).

R Imp. Relativement imperméable : mélange en proportions à peu près égales de sols Imp. et de sols perméables (voir plus loin). Sols Imp. mais avec un peu de végétation. Recouvrement gravillonnaire d'épaisseur notable. Sols avec pellicule imperméable fragile. Certaines arènes granitiques ? (P3).

P. Sols perméables : pour 70 ou 85 % de la surface : certains éboulis avec produits de décomposition assez peu perméables ; roches très diaclasées et disloquées si la pente n'est pas négligeable ou avec couvert végétal de graminée. Sables grossiers (P4).

S Surface du bassin en km²

Averse décennale : 24 h pluie journalière décennale telle qu'elle est déduite des relevés pluviométriques classiques, inférieure de 5 % à la vraie pluie de 24 h décennale. Elle comporte une averse principale prédominante.

Tr de 15' : Averse comportant une tranche de 15' de fréquence décennale. Sa hauteur est très inférieure à l'averse principale précédente.

Tr de 30' : Averse comportant une tranche de 30' de fréquence décennale. Sa hauteur est légèrement inférieure à celle de l'averse principale de P 24 h.

Kr % : Coefficient de ruissellement superficiel de l'averse décennale précédente.

Pib : Pluie d'imbibition en mm.

Hr : Lame ruisselée totale.

Tm1 : Temps de montée de l'hydrogramme instantané.

Tb1 : Temps de base de l'hydrogramme instantané (durée du ruissellement superficiel).

Tm2 : Temps de montée de la crue produite par l'averse décennale lorsqu'elle n'est plus unitaire.

Tb2 : Temps de base de la crue produite par le corps de l'averse étudiée (sans tenir compte du ruissellement éventuel produit par la fin de traîne).

Tb2t : Temps de base approximatif de la crue produite par la pluie décennale de 24 h y compris le ruissellement approximatif résultant de la fin de traîne, s'il y a lieu.

a₁ : Coefficient de pointe : Rapport du débit maximum décennal ruisselé Q10 au débit moyen de ruissellement pendant la durée du temps de base Tb2.

a₂ : Coefficient de pointe : Rapport du débit maximum décennal ruisselé Q10 au débit moyen de ruissellement pendant la durée du temps de base Tb2t si la fin de traîne ruisselle.

a_p : Coefficient de pointe : Rapport du débit maximum ruisselé Q10 au débit moyen ruisselé correspondant au volume total de ruissellement produit par la pluie décennale de 24 h y compris celui de l'averse secondaire, si elle ruisselle, et celui de la fin de traîne, mais cette moyenne est calculée sur le temps de base de l'hydrogramme produit par le corps Tb2.

Q10 : Débit décennal maximum de ruissellement ou Qmaxr de la crue décennale en m³s⁻¹.

q10 : Débit décennal maximum spécifique de ruissellement en m³s⁻¹ km⁻². C'est Q 10 divisé par S.

Si la traîne ne ruisselle pas, il n'y a pas de Tb2t, pas de a₂ et a_p = a₁.

Pour que ces tableaux soient complets on y a rapporté certaines valeurs des différents paramètres pour le cas où l'averse décennale est unitaire.

Dans ce cas : Tm1, Tb1 = Tb2. a_p et a₁ sont égaux à 2,5.

ANNEXE 2 (1)

CRUES DECENNALES DES PETITS BASSINS VERSANTS DE 1 A 10 KM²

Averse de 24 heures décennale ponctuelle 100 mm

Type de bassin	Averse décennale	Kr %	Pib mm	Hr mm	Tm1 min	Tb1 min	Tm2 min	Tb2 min	Tb2t min	a1	a2	ap	Q10 m ³ s ⁻¹	q10 m ³ s ⁻¹ km ⁻²
<u>Iq 60 Imp.</u> 1,1 km ² P10 = 100	24 h	84	3,5	84	7,52	32	29	109,7	169,7	2,76	4,05	2,54	35,6	32,4
	Tr. de 15'	79	3,5	59,4	7,52	32	21	89	119	3,49	4,54	3,37	41,1	37,4
	Tr. de 30'	82,2	3,5	75	7,52	32	29	99,6	149,6	3,11	4,53	2,93	40,6	36,9
<u>Iq 60 Imp.</u> 5 km ² P10 = 90	24 h	77,5	4,5	69,8	11,2	50,4	32	115	155	2,59	3,49	2,55	129	25,8
	Tr. de 15'	73	4,5	50,3	11,2	50,4	20	100	120	3,39	3,99	3,27	139	27,8
	Tr. de 30'	75,8	4,5	62,2	11,2	50,4	30	108	138	2,81	3,51	2,72	131	26,2
<u>Iq 60 Imp.</u> 10 km ² P10 = 86	24 h	72,7	5,5	62,5	14	65	33	122	142	2,63	3,02	2,59	221	22,1
	Tr. de 15'	67,7	5,5	44,5	14	65	25	106	116	3,03	3,29	3,01	211	21,1
	Tr. de 30'	70,8	5,5	55,5	14	65	32	118	129	2,91	3,16	2,89	227	22,7
<u>Iq 60 R. Imp.</u> 1,1 km ²	24 h	51,5	8	51,5	7,52	32	27	101				2,78	26,0	23,6
	Tr. de 15'	48,2	8	37,6	7,52	32	18	80				3,50	30,1	27,4
<u>Iq 60 R. Imp.</u> 5 km ²	24 h	44,5	9	40,1	11,2	50,4	31	107				2,70	84	16,8
	Tr. de 15'	40,6	9	27,9	11,2	50,4	20	90				2,80	78,1	15,6
	Tr. de 30'	43	9	35,3	11,2	50,4	26	100				2,93	86,2	17,2
<u>Iq 60 R. Imp.</u> 10 km ²	24 h	40,5	10	34,8	14	65	32	116				2,73	137	13,7
<u>Iq 60 P.</u> 1,1 km ²	24 h	25	15	25	7,52	32	21	85				2,54	13,7	12,5
	Tr. de 15'	23	15	17,3	7,52	32	14,5	68				3,36	15,6	14,2
<u>Iq 60 P.</u> 5 km ²	24 h	22	16	19,8	11,2	50,4	25	94				2,53	44,2	8,8
<u>Iq 60 P.</u> 10 km ²	24 h	21	17	17	14	65	26	104				2,55	73,8	7,4

ANNEXE 2 (2)

CRUES DECENNALES DES PETITS BASSINS VERSANTS DE 1 A 10 KM²

Averse de 24 heures décennale ponctuelle 100 mm

Type de bassin	Averse décennale	Kr %	Pib mm	Hr mm	Tm1 min	Tb1 min	Tm2 min	Tb2 min	Tb2t min	a1	a2	ap	Q10 m ³ s ⁻¹	q10 m ³ s ⁻¹ km ⁻²
<u>Ig 25 Imp.</u> 1,1 km ²	24 h	78	3,8	78	15,6	58	37	131	171	2,83	3,53	2,69	29,3	26,6
	Tr. de 15'	73,6	3,8	57,4	15,6	58	27	110	150	3,06	4,06	2,91	27,9	25,4
<u>Ig 25 Imp.</u> 5 km ²	24 h'	70	5	63	23,7	87,5	39	145	165	2,65	3,13	2,57	93	18,6
<u>Ig 25 Imp.</u> 10 km ²	24 h	65,2	6	56,1	30	108	45	160	180	2,58	2,88	2,55	149	14,9
<u>Ig 25 R. Imp.</u> 1,1 km ²	24 h	43,5	9	43,5	15,6	58	35	122				2,79	18,3	16,6
	Tr. de 15'	41,3	9	32,2	15,6	58	23	101				3,12	18,2	16,5
<u>Ig 25 R. Imp.</u> 5 km ²	24 h	37	10	33	23,7	87,5	42	136				2,75	55,6	11,1

ANNEXE 2 (3)

CRUES DECENNALES DES PETITS BASSINS VERSANTS DE 1 A 10 KM²

Averse de 24 heures décennale ponctuelle 100 mm

Type de bassin	Averse décennale	Kr %	Pib mm	Hr mm	Tm1 min	Tb1 min	Tm2 min	Tb2 min	Tb2t min	a1	a2	ap	Q10 m ³ s ⁻¹	q10 m ³ s ⁻¹ km ⁻²
<u>Ig 25 R. Imp</u> 10 km ²	24 h	35	10,5	30,1	30	109	44	148				2,57	87	8,7
<u>Ig 25 P.</u> 1,1 km ²	24 h	(23,5)	15,5	23,5			29	107		2,63			10,6	9,6
<u>Ig 25 P.</u> 5 km ²	24 h	(21)	16	18,9			36	124,5		2,58			32,6	6,5
<u>Ig 25 P.</u> 10 km ²		(19)	17,5	16,4			41	139,5		2,49			48,8	4,88
<u>Ig 15 Imp</u> 1,15 km ²	24 h	72	4,2	72	25	85	47	153	188	2,72	3,25	2,61	23,5	20,4
<u>Ig 15 Imp</u> 5 km ²	24 h	64	5,4	57,6	37	122	54	173	193	2,58	2,84	2,53	70,3	14,1
<u>Ig 15 Imp</u> 10 km ²	24 h	59	6,3	50,7	46	149	60	192	202	2,62	2,74	2,60	115	11,5
<u>Ig 15 R. Imp</u> 1,15 km ²	24 h	35,5	10	35,5	25	85	44	138				2,66	13,1	11,4
<u>Ig 15 R. Imp</u> 5 km ²	24 h	30,5	11	27,5	37	122	48	161				2,65	37,6	7,5
<u>Ig 15 R. Imp</u> 10 km ²	24 h	29	12	24,9	46	149	54	180				2,58	59,6	6,0
<u>Ig 15 P.</u> 1,15 km ²	24 h	21,5	16	21,5	25	85,3	37	129				2,66	8,05	7,0
<u>Ig 15 P.</u> 10 km ²	24 h	17,5	18	15,1	46	149	50	172				2,48	36,9	3,7

ANNEXE 2 (4)

CRUES DECENNALES DES PETITS BASSINS VERSANTS DE 1 A 10 KM²

Averse de 24 heures décennale ponctuelle 100 mm

Type de bassin	Averse décennale	Kr %	Pib mm	Hr mm	Tm1 min	Tb1 min	Tm2 min	Tb2 min	Tb2t min	a1	a2	ap	Q10 m ³ s ⁻¹	q10 m ³ s ⁻¹ km ⁻²
<u>Ig 7 Imp</u> 1 km ²	24 h	66,5	4,8	66,5	40	204	64	264	289	2,57	2,75	2,50	10,5	10,5
<u>Ig 7 Imp.</u> 5 km ²	24 h	57,7	6	51,9	66,5	317	70	352	364	2,49	2,54	2,47	30,4	6,1
<u>Ig 7 Imp</u> 10 km ²	24 h	53		45,6	85,2	394	85	394				2,5 (1)	48,3	4,8
<u>Ig 7 R. Imp</u> 1 km ²	24 h	29,4	12	29,4	40	204	56	249				2,56	5,1	5,1
<u>Ig 7 R. Imp.</u> 5 km ²	24 h	23	13	20,7	66,5	316,5	73	336				2,50	12,8	2,56
<u>Ig 7 R. Imp</u> 10 km ²	24 h	22		18,9	85,2	394	85	394				2,5 (1)	20	2,0

ANNEXE 2 (5)
CRUES DECENNALES DES PETITS BASSINS VERSANTS DE 1 A 10 KM²
Averse de 24 heures décennale ponctuelle 100 mm

Type de bassin	Averse décennale	Kr %	Pib mm	Hr mm	Tm1 min	Tb1 min	Tm2 min	Tb2 min	Tb2t min	a1	a2	ap	Q10 m ³ s ⁻¹	q10 m ³ s ⁻¹ km ⁻²
<u>Ig 3 Imp</u> 1 km ²	24 h	59,5		59,5	125	457	125	457				2,5	5,4	5,4
<u>Ig 3 Imp</u> 5 km ²	24 h	52		46,8	226	730	226	730				2,5	13,4	2,7
<u>Ig 3 Imp</u> 10 km ²	24 h	46		39,6	294	885	294	885				2,5	18,7	1,9
<u>Ig 3 R. Imp</u> 1 km ²	24 h	19 ?		19	125	457	125	457				2,5	1,72	1,7
<u>Ig 3 R. Imp</u> 5 km ²	24 h	15 ?		13,5	226	730	226	730				2,5	3,85	0,77
<u>Ig 3 R. Imp</u> 10 km ²	24 h	14 ?		12	294	885	294	885				2,5	5,65	0,56

(1) Averse de 100 mm unitaire : $\alpha = 2,5$.

ANNEXE 2 (6)

CRUES DECENNALES DES PETITS BASSINS VERSANTS DE 1 A 10 KM²

Averse de 24 heures décennale ponctuelle 70 mm

Type de bassin	Averse décennale	Kr %	Pib mm	Hr mm	Tm1 min	Tb1 min	Tm2 min	Tb2 min	Tb2t min	a1	a2	ap	Q10 m ³ s ⁻¹	q10 m ³ s ⁻¹ km ⁻²
<u>Ig 60 Imp</u> 1,1 km ² P10 = 70	24 h	77,7	3,5	54,4	7,52	32	28	94,5	127,5	2,64	3,42	2,49	26,3	23,9
	Tr. de 15'	70	3,5	36,5	7,52	32	18	81	96	3,68	4,30	3,63	30,0	27,3
<u>Ig 60 Imp</u> 5 km ² P10 = 63	24 h	71,7	4,8	45,2	11,2	50,4	31	103	118	2,57	2,87	2,51	92	18,3
	Tr. de 30'	70,7	4,8	41,2	11,2	50,4	31	92,5	103	2,66	2,80	2,65	98,4	19,7
<u>Ig 60 Imp</u> 10 km ² P10 = 59,5	24 h	66	6	39,3	14	65	33	115		2,57			146	14,6
	Tr. de 30'	65,9	6	35,9	14	65	32	105		2,70			154	15,4
<u>Ig 60 R. Imp</u> 1,1 km ²	24 h	47	8,5	32,9	7,52	32	26	89		2,51			17	15,4
<u>Ig 60 R. Imp</u> 5 km ²	24 h	40	9,5	25,2	11,2	50,4	27	97		2,45			53	10,6
<u>Ig 60 R. Imp</u> 10 km ²	24 h	34,5	10,5	20,5	14	65	30	110		2,54			79	7,9
<u>Ig 60 P.</u> 1,1 km ²	24 h	20?	16	14?	7,52	32	18	73		2,45			8,63	7,85
<u>Ig 60 P.</u> 5 km ²	24 h	18?	17	11,3?	11,2	50,4	22	83,5		2,40			27	5,4
<u>Ig 60 P.</u> 10 km ²	24 h	16,7?	18	9,9	14	65	26	95		2,47			42,6	4,3

ANNEXE 2 (7)

CRUES DECENNALES DES PETITS BASSINS VERSANTS DE 1 A 10 KM²

Averse de 24 heures décennale ponctuelle 70 mm

Type de bassin	Averse décennale	Kr %	Pib mm	Hr mm	Tm1 min	Tb1 min	Tm2 min	Tb2 min	Tb2t min	a1	a2	ap	Q10 m3s-1	q10 m3s-1 km-2
<u>Ig 25 Imp</u> 1,1 km ²	24 h	72	4,2	50,4	15,6	58	34	115	135	2,47	2,84	2,42	19,3	17,5
<u>Ig 25 Imp</u> 5 km ²	24 h	65,5	5	41,3	24	88	38	135		2,45			62,5	12,5
<u>Ig 25 Imp</u> 10 km ²	24 h	59	6,3	35,1	30	108	44	150		2,53			98,5	9,9
<u>Ig 25 R. Imp</u> 1,1 km ²	24 h	40,5	10	28,4	15,6	58	36	110		2,47			11,7	10,6
<u>Ig 25 R. Imp</u> 5 km ²	24 h	35	11	21,9	24	88	37	129		2,60			36,7	7,3
<u>Ig 25 R. Imp</u> 10 km ²	24 h	30,3	11,5	18	30	109	43	141		2,54			54,1	5,4
<u>Ig 25 P.</u> 1,1 km ²	24 h	17,5	16,5	12,3	15,6	58	25	100		2,52			6	5,45
<u>Ig 25 P.</u> 5 km ²	24 h	16,5?	17,3	10,4	24	88	33	120		2,54			19	3,8
<u>Ig 25 P.</u> 10 km ²	24 h	15,3?	18	9,1	30	109	32	137		2,44			27,6	2,8
<u>Ig 15 Imp</u> 1,15 km ²	24 h	66,2	5	46,3	25	85	46	137	147	2,51	2,68	2,50	16,2	14,1
<u>Ig 25 Imp</u> 5 km ²	24 h	58,2	6	36,7	37	122	50	161		2,54			48,3	9,7

ANNEXE 2 (8)
CRUES DECENNALES DES PETITS BASSINS VERSANTS DE 1 A 10 KM²
Averse de 24 heures décennale ponctuelle 70 mm

Type de bassin	Averse décennale	Kr %	Pib mm	Hr mm	Tm1 min	Tb1 min	Tm2 min	Tb2 min	Tb2t min	a1	a2	ap	Q10 m ³ s ⁻¹	q10 m ³ s ⁻¹ km ⁻²
<u>Ig 15 Imp</u> 10 km ²	24 h	52	6,8	31	46	149	50	182		2,41			68,3	6,8
<u>Ig 15 R. Imp</u> 1,15 km ²	24 h	33,5	11	23,5	25	85	38	131		2,63			9	7,8
<u>Ig 15 R. Imp</u> 5 km ²	24 h	29,2	12	18,4	37	122	50	156		2,52			24,7	4,8
<u>Ig 15 R. Imp</u> 10 km ²	24 h	25,7	12,7	15,3	46	149	50	172		2,52			37,4	3,7
<u>Ig 15 P.</u> 1,15 km ²	24 h	16	17	11,2	25	85	36	117		2,57			4,7	4,1
<u>Ig 15 P</u> 10 km ²	24 h	14	19	8,3	46	149	50	163		2,53			21,2 (1)	2,1
<u>Ig 7 Imp</u> 1 km ²	24 h	60,3	5,5	42,2	40	204	60	248	253	2,53	2,58	2,52	7,2	7,2
<u>Ig 7 Imp</u> 5 km ²	24 h	51,6	7	32,5	67	317	72	340		2,51			20	4
<u>Ig 7 Imp</u> 10 km ²	24 h	45,3		27	85	394				2,5 (2)			28,5	2,8
<u>Ig 7 R. Imp</u> 1 km ²	24 h	24,5	12,5	17,2	40	204	56	241		2,60			3,1	3,1
<u>Ig 7 R. Imp</u> 5 km ²	24 h	21,5	14	13,6	67	317		324		2,5 (2)			8,9	1,7

ANNEXE 2 (9)

CRUES DECENNALES DES PETITS BASSINS VERSANTS DE 1 A 10 KM²

Averse de 24 heures décennale ponctuelle 70 mm

Type de bassin	Averse décennale	Kr %	Pib mm	Hr mm	Tm1 min	Tb1 min	Tm2 min	Tb2 min	Tb2t min	a1	a2	ap	Q10 m ³ s ⁻¹	q10 m ³ s ⁻¹ km ⁻²
<u>Ig 7 R. Imp</u> 10 km ²	24 h	19,5		11,6	85	394				2,5 (2)			12,31	1,23
<u>Ig 3 Imp</u> 1 km ²	24 h	54,5		38,2	125	458				2,5 (2)			3,48	3,48
<u>Ig 3 Imp</u> 5 km ²	24 h	45,5		28,7	225	730				2,5 (2)			8,2	1,68
<u>Ig 3 Imp</u> 10 km ²	24 h	39,5		23,5	294	892				2,5 (2)			11	1,1

(1) Q10 = 21 m³ s⁻¹ avec crue considérée comme unitaire

(2) Averse unitaire

ANNEXE 3

Quelques corrections aux valeurs de caractéristiques de crues des petits bassins versants du Sahel publiées par RODIER (1986).

L'étude approfondie des coefficients de pointe et des temps de base de l'hydrogramme composé sur bassins fictifs représente pratiquement toutes les catégories de pente et d'infiltrabilité et les trois surfaces de bassin, 1 km², 5 km² et 10 km² ; cette étude et le nouveau calcul des crues décennales à partir de l'hydrogramme composé ont mis en évidence un certain nombre de faits qui ont conduit à revoir certaines des caractéristiques évaluées en 1986.

Dans la première étude, on avait eu le plus grand souci de ne pas aboutir à des valeurs surestimées de T_{b1} du fait de la prise en compte de couples averses-crues avec une durée du corps trop élevée. On a constaté lors des études d'hydrogrammes composés que le choix d'une durée efficace du corps égale à la moitié du temps de montée était un peu stricte. On a donc pu augmenter légèrement trois temps de base légèrement sous-estimés. Par contre, il convenait d'être particulièrement vigilant sur le ruissellement de la traîne pour les bassins très imperméables. En 1986, la distinction entre forme de l'hydrogramme au début et à la fin de la saison des pluies n'a pas été faite sur un nombre suffisant de bassins versants alors que ce devrait presque être une règle générale, et ceci a joué sur deux valeurs de α .

Dans l'annexe II de la note de 1986, l'importance de la traîne a été nettement surestimée pour Mogodé B d'où des coefficients de ruissellement trop faibles. Pour Tchaolol, au contraire, la courbe L_r corrigée en fonction de P_m conduisait à des valeurs trop fortes de L_r . Pour Kountkouzout SS et surtout Niamey, des observations de terrain et des mesures ont apporté des éléments nouveaux qui imposaient des modifications aux caractéristiques des hydrogrammes.

Enfin, l'influence de l'indice de pente $I_{g_{cor}}$ variant beaucoup entre 7 et 25 m/km, on a dû préciser les valeurs de $I_{g_{cor}}$ pour trois bassins ; de plus une indication qualitative du rapport de Sofaya a conduit à majorer la valeur très hypothétique de $I_{g_{cor}}$ pour ce bassin.

De façon générale, il n'y a pas à comparer les valeurs de K_{r10} de la note de 1986, avec les valeurs actuelles. Une partie de ces valeurs a été calculées à partir de la régression entre P_{10} et P annuelle pour laquelle la dispersion est beaucoup trop forte ; les cas les plus flagrants sont ceux de Tikaré I, Tikaré II et Ansouri pour lesquels P_{10} donné par la régression est 105 mm alors que le réseau de courbes du CIEH donne 91 mm.

Cela modifie peu les courbes et ne change rien aux conclusions de la note de 1985 pas plus que les corrections qu'on trouvera ci-après.

Bassin de Kountkouzout SS : La courbe d'étalonnage nous avait paru conduire à de fortes surestimations. En fait, un coefficient de Strickler de 40 avec une hauteur d'eau de 60 cm sur quelques mètres de large laisse rêveur, mais un récent examen par CASENAVE, du bassin et de ses possibilités apparentes, nous donne à penser que les chiffres de ruissellement obtenus par VUILLAUME, en prenant beaucoup de précautions, sont moins surestimés que nous le pensions.

En conséquence, on a repris comme suit le calcul des valeurs de Kr.

$\begin{array}{r} \text{Hr } 70 = 52,8 \times 0,41 = 21,65 \\ 15,2 \times 0,68 = 10,34 \\ 2 \times 0 = 0 \\ \hline 31,99 \text{ mm} \end{array}$	$\begin{array}{r} \text{Hr } 100 = 52,8 \times 0,41 = 21,65 \\ 29,2 \times 0,72 = 21,02 \\ 13,5 \times 0,77 = 10,40 \\ 4,5 \times 0 = 0 \\ \hline 53,07 \text{ mm} \end{array}$
--	---

$$Kr70 = \frac{31,99}{70} = 53,1 \text{ \% au lieu de } 43,5$$

$$Kr100 = \frac{53,10}{100} = 53,1 \text{ \% au lieu de } 50 \text{ \%}$$

Une erreur de frappe à la page VI a reporté une traîne de 4,5 mm au lieu de 2 en ce qui concerne P70 et l'inverse pour P100 mais les résultats du calcul étaient corrects.

Bassin de Kountkouzout-Barrage : La valeur de $I_{g,cor}$ avait été calculée à partir de l'altitude inférieure de 455 pris pour altitude de la station alors que c'est une altitude "moyenne" pour le bassin. L'altitude réelle de la station est de l'ordre de 443 m. Il en résulte une valeur de $I_g = 23$ au lieu de $I_g = 17$. Le temps de base observé 72 minutes est de 20 à 30 % supérieur à la valeur normale pour $I_g = 23$ (correspondant à $I_{comp} = 1,30$).

Bassin de Mogodé B : On a repris comme suit les calculs de Kr :

$\begin{array}{r} \text{Hr } 70 = 42,6 \times 0,24 = 10,2 \\ 25,4 \times 0,31 = 7,87 \\ 2 \times 0 = 0 \\ \hline 18,07 \text{ mm} \end{array}$	$\begin{array}{r} \text{Hr } 100 = 42,6 \times 0,24 = 10,2 \\ 52,4 \times 0,38 = 19,9 \\ 5 \times 0 = 0 \\ \hline 30,1 \text{ mm} \end{array}$
--	--

$$Kr70 = \frac{18,07}{70} = 25,8 \text{ au lieu de } 24,5 \text{ \%}$$

$$Kr100 = 30 \text{ \% au lieu de } 27 \text{ \%}$$

Bassin de Niamey VI : Le bassin est en fait constitué en grande partie de sables de Niamey avec végétation, qui ne ruissellent pas pour des averses de l'ordre de 100 mm (on le sait depuis les dernières mesures au minisimulateur) et de grès nettement plus imperméables dont le coefficient de ruissellement croît avec la valeur de Pm.

Dans ces conditions, les hypothèses de croissance de Kr pour de fortes valeurs de Pm conduisaient à des ruissellements surestimés ; il est plus raisonnable de calculer Kr100 comme suit :

$$\begin{array}{r}
 \text{Hr100} = 70 \times 0,14 = 9,8 \\
 \quad 27 \times 0,30 = 8,1 \\
 \quad 3 \times 0 = 0 \\
 \quad \quad \quad \text{-----} \\
 \quad \quad \quad 17,9 \text{ mm}
 \end{array}$$

$$Kr100 = \frac{17,9}{100} = 17,9 \text{ arrondi à } 18 \%$$

Kr70 reste inchangé.

Tb1 est passé de 45 - 55 à 60 d'après les deux plus forts écoulements. La nature du bassin telle qu'elle est présentée plus haut laisse à penser que pour les faibles écoulements la superficie affectée par le ruissellement est encore plus faible que pour les fortes averses, d'où les valeurs de 45' qui sont pourtant bien nettes sur l'hydrogramme.

Igcor qui est bien mal connu a été majoré, car ce qui compte c'est surtout la partie qui ruisselle dont la pente est supérieure à la pente moyenne du bassin. On a donc adopté : Igcor = 10 ? au lieu de Igcor = 7 ?.

Bassin de Kolel : La courbe d'étalonnage est surestimée, probablement de 25 % pour les deux plus forts débits, mais il n'a pas été tenu compte de ces deux averses pour les calculs de Kr70 et Kr100.

Pour une averse décennale de 24 h, Kr10 serait égal à 22,2 %.

Pour la tranche de 15 min. décennale, Kr étant pour ce bassin très sensible aux fortes intensités, on a adopté Kr = 32 %, I_{max} étant égal à 172 mm/h, cette valeur de 32 % est compatible avec ce qui a été observé sur le bassin pour les averses à fortes intensités.

Bassin de Sofoya V : Aucun élément topographique, le rapport indique une "pente relativement forte", d'après nos souvenirs ce n'est certainement pas $I_g = 60$ m/km, 25 m/km serait un grand maximum et 10 m/km un minimum, nous avons pris 20 m/km au lieu de 15 ? dans la note de 1986.

Bassin de Diam-Nadié : On a jugé inutile d'arrondir à 11 le chiffre de Dubreuil qui était de 10,8 ; la documentation topographique ne permet pas de calculer $I_{g_{cor}}$ mais a priori, l'aspect du terrain montre qu'il ne paraît pas nécessaire de tenir compte des pentes transversales, l'action des cultures sur le temps de base est ici un facteur de dispersion qui est infiniment plus important.

Bassin de Pô : Contrairement aux cas des bassins de Niamey VI et de Sofoya on dispose ici d'une bonne carte topographique du bassin qui permet sans difficulté de revoir de près $I_{g_{cor}}$ pour lequel on avait estimé un chiffre rond de 10 m/km dans la note de 1986 alors qu'on ne soupçonnait pas la grande sensibilité de la valeur de T_{b2} à $I_{g_{cor}}$ entre 7 et 15 m/km.

$$I_L = 8,5 \quad I_T = 16$$

$$I_{g_{cor}} = \frac{8,5 + 16}{2} = 12,75 \text{ soit } 12,8 \text{ m/km (au lieu de 10 m/km)}$$

Bassin de Bouloré : Nous avons admis $T_{b1} = 50$ min. au lieu de 45-50 pour la raison indiquée en tête de cette annexe.

Tchalol : Nous avons regardé de très près ce bassin qui présente la particularité d'un coefficient de ruissellement beaucoup plus élevé que celui de Polaka et des débits de pointe observés plus faibles.

La courbe L_r (lame ruisselée) en fonction de P_m avait été dans les études de la note de 1985 tracée sommairement, en-dessous de la courbe "Lr" du rapport, celle-ci comprenant la totalité de l'écoulement y compris l'écoulement intermédiaire.

La courbe de 1986 était telle que L_r de la courbe devrait être majorée de 17 % pour retrouver L_r de l'averse du 29 août 1977 très favorisée, alors qu'il fallait majorer de 30 % la valeur de L_r du 19 juillet 1979 défavorisée pour retrouver la courbe moyenne ce qui pour un bassin assez peu perméable paraissait peu vraisemblable. Avec la nouvelle courbe qui passe par le point $P_m = 50$ mm $L_r = 20$ mm (au lieu de 22,3 mm pour la courbe de 1986), la majoration pour cette seconde crue n'est plus que de 20 % au lieu de 30 % ce qui est plus vraisemblable (la majoration pour la crue du 29 août 1977 est alors de 19,5 %) : On déduit de cette nouvelle courbe les valeurs de L_r suivantes :

$$\overline{P70} = 70 \times 0,86 = 60 \text{ mm} \quad Hr60 \text{ mm} = 28,15 \text{ mm} \quad Kr70 = \frac{28,15}{60} = 46,8\% \text{ au lieu de } 49\%$$

$$\overline{P100} = 86 \text{ mm} \quad Hr86 \text{ mm} = 45,15 \text{ mm} \quad Kr100 = \frac{45,15}{86} = 52,5\% \text{ au lieu de } 58\%$$

On a revu le calcul de α . pour la crue du 9 juin 1980 le temps de base étant réduit à 144' on trouve pour cette crue $\alpha = 2,05$.

Mais toutes ces crues sont trop faibles et on a essayé de tirer parti de la forte crue du 19 juillet 1979 dont la forme un peu bizarre, grosse bosse avec quelques pointes, s'explique très bien lorsque l'on songe aux divers hydrogrammes des tributaires qui tendent à se fondre en un seul. La crue est perturbée par deux recrudescences de la pluie, l'une avec un maximum de 6,6 mm/h (au pluviographe) et l'autre avec un maximum de 7,5 mm/h ; la bosse correspondant à la première est bien visible sur l'hydrogramme. Le corps ne dure que 40' il est un peu fort pour une crue décennale. On a essayé de reconstituer l'hydrogramme résultant de ce seul corps d'averse avec deux hypothèses pour le temps de base $Tb2$: 170' et 190'.

On prend les valeurs vraisemblables pour le débit d'écoulement retardé : 2,3 à 3 m^3s^{-1} .

Dans la première hypothèse :

$$Vr = 127\,200 \text{ m}^3s^{-1} \quad Tb2 = 170 \times 60 = 10\,200 \text{ s.}$$

$$Qr = \frac{127\,200}{10\,200} = 12,46 \text{ m}^3s^{-1} \quad Qmaxr = 21,5 \text{ m}^3s^{-1} \quad \alpha = \frac{21,5}{12,46} = 1,74$$

Dans la seconde hypothèse :

$$Vr = 127\,200 + 8\,500 = 135\,700 \text{ m}^3 \quad Tb2 = 190 \times 60 = 11\,400 \text{ s.}$$

$$Qr = \frac{135\,700}{11\,400} = 11,9 \text{ m}^3s^{-1} \quad Qmaxr = 22 \text{ m}^3s^{-1} \quad \alpha = \frac{22}{11,9} = 1,85$$

En prenant $\alpha = 1,9$ pour l'hydrogramme instantané on reste en accord avec ces évaluations.

Bassin de Abou Goulem : La valeur de α donnée en 1986 était la valeur valable après le 15 août ; avant le 15 août donc en début de saison des pluies on doit prendre $\alpha = 2,6$.