

ORSTOM
LABORATOIRE D'HYDROLOGIE
Montpellier

C I E H
Ouagadougou

TRANSPOSITION DES DONNEES HYDROLOGIQUES

UTILISATION DES BASSINS REPRESENTATIFS
POUR LA PREDETERMINATION DES CRUES ET
L'ESTIMATION DES APPORTS AU SAHEL.

par

J. A. RODIER

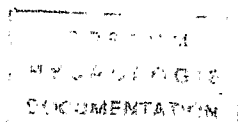
P. RIBSTEIN

13 JUIN 1994

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 39647

Cote : B



Montpellier, Mai 1986

81193

TRANSPOSITION DES DONNEES HYDROLOGIQUES

UTILISATION DES BASSINS REPRESENTATIFS POUR LA PREDETERMINATION DES CRUES ET L' ESTIMATION DES APPORTS AU SAHEL

J. A RODIER *, P. RIBSTEIN **

INTRODUCTION

Lors de l'aménagement d'un bassin versant représentatif ou expérimental, l'objectif principal est toujours l'étude fine des mécanismes qui régissent le cycle de l'eau. Une fois ces mécanismes à peu près maîtrisés, l'objectif secondaire devient la transposition des résultats à des bassins non étudiés. C'est le principal intérêt de toutes les synthèses de bassins effectuées à travers le Monde.

Au Sahel, les hydrologues de l'ORSTOM ont équipé les premiers bassins vers 1950. Environ 90 bassins ont été étudiés à ce jour dans cette région comprise entre le Sahara au Nord et l'isohyète 850 mm au Sud.

Les observations font l'objet de nombreuses publications sous forme de rapports techniques spécifiques et d'un premier recueil des données de base publiés par DUBREUIL et al. (1972). Ces résultats ont déjà servi à des transpositions pour l'estimation des crues (RODIER et AUVRAY, 1965) ; (PUECH et CHABI-GONNI, 1984) et des apports (RODIER, 1975).

Le présent travail expose les travaux en cours à l'ORSTOM sur la synthèse des bassins versants représentatifs et expérimentaux.

Un accent particulier sera mis sur la prédétermination des fortes crues sur petits bassins sahéliens (programme de recherche FORCRUSA de l'ORSTOM), car ce thème est prioritaire pour l'ORSTOM et le CIEH. Nous donnerons plus loin un certain nombre de résultats obtenus dans le cadre de ce programme FORCRUSA.

* Ancien chef du Service Hydrologique de l'ORSTOM,
39 Rue de la Porée
85470 - BRETIGNOLLES sur Mer

** Hydrologue,
Laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM
MINIPARC Bât. 2 Rue de la Croix Verte
- ZOLAD - 34100 MONTPELLIER

Nous insisterons dans le premier chapitre sur le traitement des observations en vue de cet objectif, et sur la précision qu'on peut en attendre.

Dans le cadre de la synthèse faite à l'ORSTOM, les valeurs anciennes sont en cours de révision dans le but :

- d'homogénéiser les résultats en employant une même méthodologie sur tous les bassins étudiés.

- de mettre à profit dans toute la mesure du possible les progrès de la recherche hydrologique dans ce domaine depuis les premières publications de 1965.

- d'étudier l'influence de la sécheresse qui sévit actuellement au Sahel, sur chaque étape de la prédétermination des crues exceptionnelles.

La transposition des résultats fera l'objet du deuxième chapitre où l'étude des méthodes existantes de régionalisation permettra de mieux cerner les améliorations possibles.

Dans un troisième chapitre, on présentera les principaux résultats de la première tranche du programme FORCRUSA et les moyens de les utiliser avec prudence en attendant des publications plus élaborées.

Un dernier chapitre sera consacré aux apports : la sécheresse actuelle doit-elle conduire à modifier les méthodes d'estimation de cette variable hydrologique sur un bassin non jaugé ?

I - LA PREDETERMINATION DES CRUES A PARTIR DES OBSERVATIONS

1 - La notion de crue décennale

Le dimensionnement d'ouvrages, tels que des évacuateurs de crue, nécessite la prédétermination d'une crue, définie par ses principales caractéristiques, volume, temps de montée, temps de base et débit de pointe, pour une période de retour donnée.

Au vu de l'importance économique des ouvrages concernés, c'est la notion de crue décennale qui est la plus employée sur les petits bassins versants. Cette grandeur statistique ne doit en aucun cas être considérée comme une norme, mais plutôt comme un indicateur, issu d'une définition : la crue décennale est une crue fictive dont le débit et le volume ont une période de retour de dix ans. Son estimation se fera après l'ajustement d'une loi théorique aux valeurs observées. Mais, même dans le cas d'un échantillon de plus de dix ans de crues, la valeur estimée d'une caractéristique, le débit de pointe décennal par exemple, sera différente suivant la période de mesure et sera très influencée par la qualité des observations.

On dispose, pour les petits bassins sahéliens, de séries assez courtes de mesure : ils ont été observés en moyenne trois ans. La prédétermination de la crue décennale sur ces bassins ne pourra donc pas se faire à partir d'un ajustement à une loi théorique. Il ne sera pas non plus possible d'employer d'autres méthodes statistiques telles que le GRADEX (extrapolation des débits de pointe à l'aide de la loi théorique suivie par les pluies maximum) qui nécessite aussi entre cinq et dix ans d'observations de 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 des fortes crues. Les tentatives qui ont été faites en utilisant, soit un modèle à discrétisation spatiale (GIRARD, 1975a; CHEVALLIER et al, 1985), soit un modèle simplifié (GIRARD, 1975b) ont été décevantes pour la prédétermination des débits maximum. Ces mauvais résultats ont mis en évidence plusieurs problèmes :

- les données, dont on dispose pour régler les paramètres du modèle, sont insuffisantes pour la grande majorité des bassins observés;

- les temps de réponse de ces petits bassins étant très courts, il faudrait utiliser des modèles avec des pas de temps petits, de l'ordre de quelques minutes (5 à 30') ce qui n'est pas possible avec les modèles choisis et avec la précision temporelle des données pour la plupart des bassins;

- les connaissances concernant les processus à l'origine des fortes crues au Sahel sont peut-être insuffisantes, ce qui conduit à choisir des critères inadaptés.

Ces différentes remarques nous inclinent à penser qu'il faudrait construire un modèle spécialement adapté à la prédétermination des fortes crues. Ce modèle pourrait être l'aboutissement des travaux en cours, comme les opérations de simulation de pluie, entreprises pour mieux comprendre les mécanismes à l'origine des fortes crues.

Devant l'impossibilité d'utiliser les méthodes classiques de prédétermination de la crue décennale, les hydrologues de l'ORSTOM ont donné une nouvelle définition de cette crue : c'est la crue provoquée par une pluie décennale, toutes les autres conditions étant moyennes (saturation du sol, état de la végétation, forme du hyétogramme de pluie ...). On admet en plus et en toutes connaissances de causes que le bassin est homogène ainsi que la pluie sur ce bassin. Cette définition est souvent appelée "modèle global".

Ce modèle présente l'avantage de pouvoir s'appliquer à des séries courtes de crues lorsqu'on dispose d'une station pluviométrique de référence suffisamment longue pour définir correctement la pluie décennale. Cette définition de la crue décennale 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?

Les modèles mathématiques ne se calant pas correctement sur les débits de pointe de crue, il n'est pas possible de répondre directement à cette question. On peut toutefois faire deux remarques concernant ce problème :

- 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 la lame ruisselée, trouvée par ce modèle, est très proche de celle que donne le modèle global ;

- la crue décennale n'est qu'un indicateur statistique : il est beaucoup plus important de calculer cet indicateur "pseudo-décennal" sur un grand nombre de bassins avec une même méthodologie, que de trouver un indicateur réellement décennal, mais qui ne pourrait être calculé que sur quelques bassins où les données le permettraient. Il ne faut pas oublier que l'objectif est la transposition des résultats à des bassins non étudiés. Or la fiabilité des méthodes de régionalisation est directement liée au nombre de bassins étudiés.

2 - Application du modèle global aux crues observées

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 est suffisamment souple pour que son application soit légèrement différente d'un bassin à l'autre suivant les données disponibles, les auteurs des études, les objectifs à atteindre Cette remarque explique que les résultats de crue décennale publiés par DUBREUIL et al. (1972) ne soient pas homogènes car ils proviennent directement des rapports de campagne.

En particulier, certains objectifs d'étude ont incité les ingénieurs à prendre des marges de sécurité plus ou moins confortables. De plus, les connaissances hydrologiques ayant évolué depuis les premières études de bassins, les critères choisis pour la prédétermination peuvent être différents suivant les époques d'observations.

Une des étapes de l'opération FORCRUSA à l'ORSTOM est la révision de toutes les valeurs de crue décennale.

Les différentes étapes de calcul de cette crue vont être détaillées dans la suite de ce chapitre en essayant de présenter, chaque fois que nécessaire, les acquis récents qui permettront d'améliorer cette prédétermination.

Cette partie est inspirée d'un travail effectué par RODIER (1984) à l'issue d'une concertation ORSTOM-OMM-CIEH.

Dans la définition du modèle global, la fonction de production consiste dans le passage de la pluie décennale à la lame ruisselée décennale. Cette fonction se détermine donc en trois étapes :

* la détermination de la pluie décennale à un poste de référence :

Les données pourront être réactualisées avec les travaux récents du CIEH sur les pluies journalières de fréquence rare. Cette réactualisation permettra d'introduire, pour chaque bassin, la période de sécheresse qui a commencé vers 1970. Le travail de ALBERGEL (à paraître), sur les pluies du BURKINA-FASO, montre que cette révision ne devrait pas introduire des variations importantes sur la pluie décennale journalière à adopter ; les écarts entre valeurs anciennes et valeurs actualisées devraient être inférieurs à 10 %, dans les 2 sens, valeur ancienne inférieure à valeur actuelle ou l'inverse.

* le passage de la pluie ponctuelle décennale à la pluie décennale moyenne sur le bassin :

Ce passage se fait par l'intermédiaire d'un coefficient d'abattement. L'étude de VUILLAUME (1974) fournit ce coefficient en fonction de la surface du bassin, de la pluviométrie interannuelle, et de la période de retour choisie.

Dès que le bassin est suffisamment grand, un coefficient d'abattement a été introduit dans les études antérieures, mais celui-ci est souvent calculé directement à partir des observations. Cela a conduit à adopter des coefficients inférieurs à ceux mis au point par VUILLAUME et donc à diminuer les lames décennales précipitées sur le bassin (RODIER, 1984).

* transformation de la lame précipitée décennale en lame ruisselée décennale :

Comme le note DUBREUIL (1985), tous les chercheurs ont effectué cette transformation en établissant des relations analytiques à partir des grandeurs mesurées lors des événements "averse-crue". Ces relations donnent, soit le coefficient de ruissellement K_r , soit la lame ruisselée L_r , en fonction explicitement ou non d'un indice d'humidité préalable. Elles sont en général établies par voie graphique, avec la méthode des déviations résiduelles. On peut noter que dans le modèle global, on déduit la lame ruisselée décennale de la pluie moyenne décennale et d'un indice d'humidité moyen. Cela équivaut donc à extrapoler la courbe moyenne lame ruisselée-lame précipitée jusqu'à la valeur de la pluie décennale, avec un indice d'humidité de valeur moyenne.

RODIER (1984-1985) a recalculé les caractéristiques de crues des bassins sahéliens inférieurs à 12 km² ; il fait trois remarques pour expliquer les différences qu'il trouve sur le coefficient de ruissellement décennal :

- au cours de leur période d'observation, certains bassins n'ont reçu que de faibles pluies ; en conséquence, l'extrapolation pour atteindre la valeur décennale est très forte, parfois hasardeuse et dans ce cas, de larges marges de sécurité ont été prises;

- les courbes lame ruisselée-lame précipitée sont tracées après séparation entre le ruissellement superficiel et l'écoulement retardé; suivant les études, les critères utilisés pour cette séparation sont très différents. Dans certains cas, aucune séparation n'a été effectuée;

- les hauteurs d'averses ont été mesurées dans les pluviomètres Association et non d'après les pluies au sol. Or, les études récentes de CHEVALLIER sur la Mare d'OURSIS (1985), ont montré que l'écart entre ces deux mesures peut être de 30 %. Certaines études anciennes qui ont imposé une limite supérieure de 100 % au coefficient de ruissellement doivent donc être révisées.

Pour le coefficient de ruissellement décennal, l'écart entre les valeurs publiées dans le recueil de DUBREUIL et al. (1972) et les valeurs révisées par RODIER peut atteindre 20 %.

La formation des fortes crues est-elle affectée par la sécheresse ?

Un article récent (ALBERGEL et VALENTIN, 1986) concerne un bassin versant sahélien étudié, d'une part, entre 1960 et 1962, et, d'autre part, en 1984. Pour une même pluie, pourtant dans des conditions d'humidité des sols comparables, les auteurs ont observé une augmentation du coefficient de ruissellement entre ces deux périodes qu'ils expliquent par une transformation des états de surface : couverture végétale et organisations pédologiques superficielles.

Dans l'état actuel des connaissances, il n'y a donc aucune raison de réduire les normes hydrologiques à appliquer pour la relation pluie moyenne-lame ruisselée, pour tenir compte de la sécheresse, au contraire.

La fonction de transfert du modèle global permet le calcul des caractéristiques de la crue décennale (temps de montée, temps de base, débit de pointe) à partir de la lame ruisselée décennale déterminée comme précédemment.

Dans la plupart des études sur petits bassins, ce calcul est fait à partir de la théorie de l'hydrogramme unitaire qui fort heureusement est applicable au Sahel. En appliquant les règles d'additivité et de linéarité de cette théorie, on obtient un coefficient α (débit maximal de crue divisé par le débit moyen) qui a une valeur homogène et caractéristique de la crue unitaire d'un bassin considéré (DUBREUIL, 1985).

Cette observation n'est valable que pour des averses courtes et intenses qui couvrent, d'une manière homogène, l'ensemble du bassin. On nomme ces averses "unitaires" dans cette théorie classique. Au Sahel, vu les caractéristiques spatiales des averses, l'application de l'hydrogramme unitaire ne pourra pas se faire sur des bassins de superficies supérieures à 100-200 km².

La révision du calcul de la fonction de transfert devra se faire d'une manière rigoureuse en tenant compte des remarques suivantes :

- il ne faut prendre en compte que les fortes crues dans la sélection des événements devant conduire à la détermination de l'hydrogramme unitaire;
- il faut séparer le ruissellement superficiel de l'écoulement retardé en employant des critères identiques sur tous les bassins;
- il faut sélectionner autant que possible des averses qui ne présentent pas de traîne avec un corps assez intense.

La synthèse des résultats de RODIER sur les très petits bassins est présentée dans le troisième chapitre.

Dans le recueil des données de base de DUBREUIL (1972), les valeurs du coefficient α sont comprises entre 1,8 et plus de 7 au Sahel. Les valeurs calculées par RODIER sont comprises entre 2 et 3,6, ce qui montre l'intérêt d'une révision de l'ensemble des valeurs en appliquant une même méthodologie.

A notre connaissance, aucune étude ne s'est intéressée à l'influence de la sécheresse sur les débits de pointe de crue. Comme pour la lame ruisselée, on peut néanmoins penser qu'il y a modification des états de surface par déficit pluviométrique et que la conséquence peut être favorable à une augmentation des pointes de crues, en réduisant le temps de transport.

La sécheresse se traduit donc, au niveau d'un bassin, d'une part, par une modification des états de surface, et, d'autre part, par une diminution du stock hydrique dans le sol; ces deux paramètres agissent de manière opposée sur la formation des crues. Leur influence respective n'étant pas encore correctement chiffrée, il n'y a pas lieu pour l'instant, de modifier les normes à appliquer concernant la crue décennale.

II - METHODES D'ESTIMATION DE LA CRUE DECENNALE SUR BASSINS NON JAUGES

Les deux méthodes d'estimation de la crue décennale utilisées au Sahel (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 méthode de RODIER et AUVRAY est basée sur une hypothèse provenant de l'application du modèle global :

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

Q₁₀ : débit de pointe de crue décennal
K : coefficient d'abattement
P₁₀ : pluie journalière décennale
Kr₁₀ : coefficient de ruissellement décennal
α : débit de pointe de crue / débit moyen
S : surface du bassin
T_b : temps de base de la crue décennale

Kr₁₀, T_b, K et α sont obtenus par des abaques en fonction de la surface, de la perméabilité globale et du relief. La méthode donne aussi par abaque en fonction des mêmes critères, le temps de montée T_m.

La méthode proposée n'est pas une simple application de la formule ci-dessus; en effet, on procède par étapes successives de façon à pouvoir corriger chaque élément, Kr₁₀ ou T_b par exemple, pour lequel une caractéristique non prise en compte du bassin conduirait à une majoration ou une réduction. Dans le troisième chapitre, des courbes spéciales sont données pour les bassins trop petits pour que la crue puisse être considérée comme unitaire.

La méthode de PUECH et CHABI-GONNI est basée sur une sélection des variables explicatives à l'aide de régressions multiples. Deux formules sont proposées suivant que l'on connaît le coefficient de ruissellement décennal ou non.

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

ou

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

Les deux méthodes sont donc proches par les critères choisis : surface, indice de pente, pluie décennale et critère de perméabilité. Les auteurs des deux méthodes soulignent l'importance de ce dernier critère qui paraît être une des deux plus grande causes d'erreurs dans l'application des méthodes. La deuxième cause d'erreurs provient de l'existence de bassins s'écartant des conditions moyennes, comme cela sera indiqué plus loin à propos du questionnaire (check-list) proposé.

Le simulateur de pluie peut être un outil très précieux pour constituer un répertoire des aptitudes au ruissellement des couches superficielles du sol au Sahel. Le critère ainsi obtenu serait moins subjectif que la perméabilité globale de RODIER et AUVRAY, critère manquant par nature d'objectivité.

Dans la méthode de PUECH, la perméabilité est introduite par l'intermédiaire du coefficient de ruissellement décennal. Sur un bassin non étudié, les auteurs proposent d'approcher ce coefficient par une fonction du type de sol et de la pluie annuelle. Mais cette approximation introduit une imprécision importante dans le calcul du débit de pointe décennal, ce qui souligne encore la priorité à donner à la recherche d'un critère d'aptitude au ruissellement qui devra être facile à obtenir sur un bassin quelconque.

Plusieurs améliorations des méthodes d'estimations sont envisageables :

- mise au point d'un questionnaire (check-list) à utiliser avant de décider d'employer une méthode. Ce questionnaire a pour but, la prise en compte de paramètres n'entrant pas dans la méthodologie de calcul lorsqu'ils prennent des valeurs s'écartant nettement des conditions moyennes, (exemple : le bassin est hétérogène en perméabilité avec une partie amont présentant un ruissellement négligeable; dans ce cas, les erreurs peuvent atteindre 100 à 200 %). RODIER achève actuellement ce check-list dont une version provisoire est présentée dans le chapitre suivant.

- préparation d'un manuel pratique concernant les travaux de terrain et les pratiques de calcul.

Ces deux documents permettraient d'envisager une méthode d'estimation complétée par l'analyse de bassins-types. En effet, il est très important de prévoir dans la méthode finale retenue, la description de quelques bassins étudiés sur lesquels telle équation de régression pour la méthode de PUECH, ou tel choix de critère (indice de perméabilité et de relief) a permis de déterminer correctement la valeur de la crue décennale. Le principe des bassins-types est celui adopté par RODIER dans le document sur les apports annuels au Sahel (1975).

III - PREMIERS RESULTATS DU PROGRAMME DE REMISE A JOUR DES METHODES DE CALCUL DE LA CRUE DECENNALE

Ces premiers résultats correspondent à la première tranche du programme FORCRUSA à l'ORSTOM. Ils concernent des mesures urgentes en vue d'éliminer de très fortes erreurs (100 à 200 %) dans l'application des méthodes actuelles et d'améliorer les éléments de calcul des très petits bassins pour lesquels les abaques mises au point en 1965 étaient pour le moins hasardeuses. Il avait été entendu avec le CIEH et l'OMM que dans toute la mesure du possible ces travaux devaient donner des résultats utilisables dans le futur quelle que soit la méthodologie de calcul.

1 - Projets principaux de recherches ou d'études de la première tranche de FORCRUSA.

Ainsi qu'on l'a vu plus haut les causes de très fortes erreurs dans le calcul de la crue décennale résultent, ou de la grande difficulté d'apprécier à priori l'infiltrabilité globale d'un sol, surtout lorsqu'il est très hétérogène, ou de valeurs de paramètres non prises en compte dans la méthodologie de calcul et qui s'écartent des valeurs courantes.

- Pour chaque bassin, les études pédologiques et l'utilisation systématique du minisimulateur de pluie permettent d'élaborer un répertoire des aptitudes au ruissellement des couches superficielles des sols qui répondra dans presque tous les cas au premier problème.

- On achève actuellement la mise au point d'un questionnaire ou "check list" à consulter obligatoirement avant tout calcul de crue sur les petits bassins versants Sahéliens. Ce questionnaire répond en grande partie aux questions posées par la seconde éventualité envisagée.

- On avait classé en première urgence la révision des caractéristiques physiques des très petits bassins, de leur coefficient de ruissellement estimé pour la crue décennale et des caractéristiques de l'hydrogramme correspondant (temps de montée, temps de base, coefficient de pointe : rapport du débit maximum ruisselé au débit moyen ruisselé pendant le temps de base).

- Enfin sans rédiger une note pratique, on pensait donner aux ingénieurs quelques éléments qui permettraient de calculer dès à présent les crues décennales des très petits bassins dans de meilleures conditions.

2 - Répertoire des aptitudes au ruissellement.

Les notes anciennes utilisent une classification qualitative d'infiltrabilité des sols P1, P2, P3, P4, P5, imaginée 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 non initiés.

Pour les bassins observés, la classification d'un bassin Pi était effectuée généralement d'après la pluie limite en dessous de laquelle il n'y a pas ruissellement (deux jours après une assez forte pluie) mais ceci n'était évidemment pas possible pour les bassins non observés.

Les travaux sur le terrain pour l'établissement du répertoire n'ont pas bénéficié de tout le financement espéré, de sorte qu'ils ne sont pas terminés, mais ils sont très avancés. L'utilisation du simulateur sur les états de surface de bassins représentatifs déjà étudiés permet d'établir la relation indispensable entre résultats du minisimulateur et résultats du bassin expérimental, ceci par reconstitution des valeurs du ruissellement du bassin après composition des résultats des différents états de surface observés. Il s'est confirmé en particulier que le programme de pluie du minisimulateur conduisait à un ruissellement nul sur certains sables de NIAMEY (P5).

3 - Questionnaire ou "check list"

Nous en donnons dans l'annexe 1 une première ébauche: la présentation sera revue et il est prévu que ce questionnaire soit remis à jour périodiquement. Il est précédé d'une courte introduction reprenant en partie ce qui a été dit plus haut. Dans un certain nombre de cas des corrections indiquées par X sont actuellement mises au point. Pour d'autres elles ne le seront que beaucoup plus tard en fonction de l'avancement de nos compétences.

4 - Révision des caractéristiques hydrologiques des très petits bassins

Cette opération est terminée et les résultats sont parus dans les cahiers de l'ORSTOM (1984-1985).

On pensait que cette étude serait 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 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 de ruissellement ou des caractéristiques de forme de l'hydrogramme on a même dû revoir un petit nombre de bassins de plus de 10 Km², qui permettaient de préciser les abaques.

Les données géographiques des bassins étudiés et les caractéristiques de leurs crues, après révision, sont données dans l'annexe 2.

Les courbes de coefficients de ruissellement en fonction de la superficie, de l'indice de pente I_g et de l'infiltrabilité représentés par R_i (classe de relief) et P_i (classe de perméabilité) ont été tracées pour trois averse-types différentes :

1°) Averse décennale journalière ponctuelle correspondant à la situation géographique du bassin : elle varie pratiquement pour tous les bassins entre 60 et 110 mm. Pour comparer les relations caractéristiques de bassins-coefficients de ruissellement, on peut s'affranchir de cette variation en utilisant une même averse sur tous les bassins (voir cas 2° et 3°).

2°) Averse décennale ponctuelle de 100 mm journalière, corps à plus de 12 mm/h correspondant à 75 % de l'averse, environ, tombant deux jours après une averse de 20 à 30 mm vers le début de la saison des pluies sauf pour les bassins à sols sableux peu profonds où on admet que cette averse survient un peu plus tard (isohyète annuelle 600 mm en principe).

3°) Averse décennale ponctuelle de 70 mm journalière; les autres conditions sont les mêmes (isohyète annuelle 200-205 mm en principe). A noter la correspondance suivante : R6. Ig. = 60. R5. Ig. = 25. R4. Ig. = 15. R3. Ig. = 7. R2. Ig. = 3.

Dans la pratique seuls les portions de courbes correspondant aux cas 2°) et 3°) seront utilisées. On détermine l'averse décennale journalière et on interpole en fonction de cette averse entre les deux courbes Ri et Pi qui correspondent aux caractéristiques du bassin.

On trouvera ci-contre les deux réseaux de courbes Kr 100 mm et Kr 70 mm (figures 1 et 2). Ces courbes seront probablement revues et précisées après la synthèse générale des bassins représentatifs de l'ORSTOM. En attendant, elles constituent déjà une sérieuse amélioration des courbes anciennes qui avaient été tracées avec beaucoup moins de données et une connaissance beaucoup plus superficielle du ruissellement au Sahel.

Les temps de montée et de base dépendent surtout de la superficie et de la pente, dans une moindre mesure de l'infiltrabilité du sol et d'un certain nombre d'autres facteurs : rugosité, allongement du bassin etc... En première approximation seuls les deux premiers facteurs ont été considérés, mais on a tenu compte des autres facteurs dans le questionnaire.

L'ajustement des courbes a été beaucoup moins sommaire qu'il y a 20 ans et pour les faibles superficies, Tm et Tb sont inférieures aux valeurs trouvées autrefois, ce qui compense des valeurs également plus faibles de Kr.

Le coefficient de pointe α pourrait être considéré comme constant et égal à 2,5. Il est compris en fait entre 2 et 3,6, mais toutes les valeurs s'écartant sensiblement de 2,5 peuvent être expliquées; dans la pratique on résout ce problème d'écart en consultant le questionnaire.

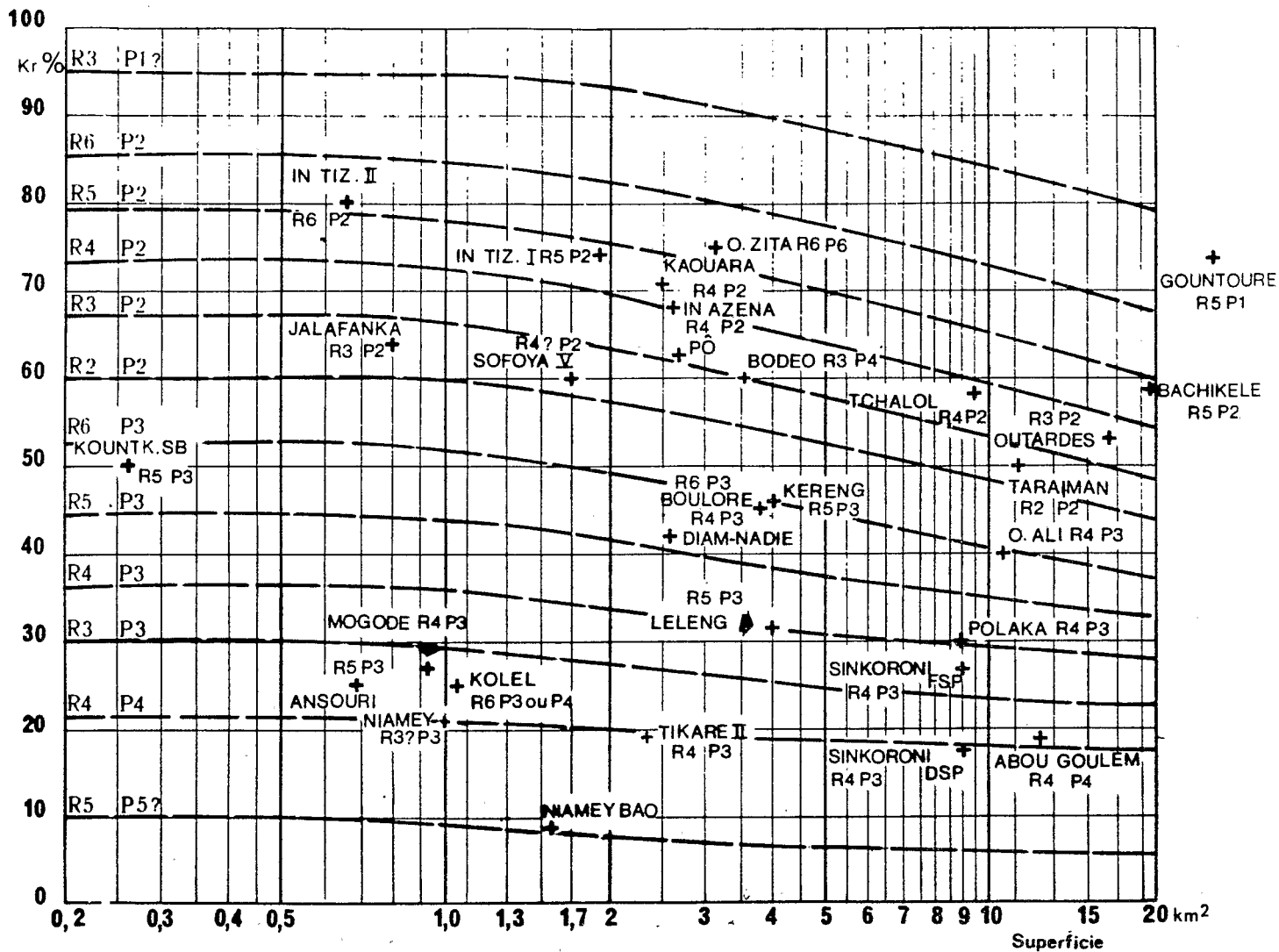
On ne doit jamais perdre de vue le fait qu'une estimation à 20 % du débit maximum décennal pour un bassin non observé est une excellente estimation et dans ces conditions si α s'écarte de 0,2 points en plus ou en moins de la valeur 2,5 cela n'a pas d'importance. Mais n'oublions pas, que dans la plupart des cas il ne s'agit que de l'hydrogramme instantané.

L'article du Cahier d'Hydrologie est accompagné d'une annexe importante qui permettra, on l'espère, de reprendre dans l'avenir s'il le faut l'analyse de Tm, Tb et Kr sur d'autres bases sans avoir à consulter les archives ou les rapports originaux, ce qui est toujours risqué si on ne connaît pas le terrain ni les conditions précises dans lesquelles ont été faites ces études anciennes.

5 - Caractéristiques de l'hydrogramme décennal :

Données pluviographiques :

Pour passer de l'hydrogramme instantané à l'hydrogramme "décennal" il faut découper en tranches l'averse décennale.



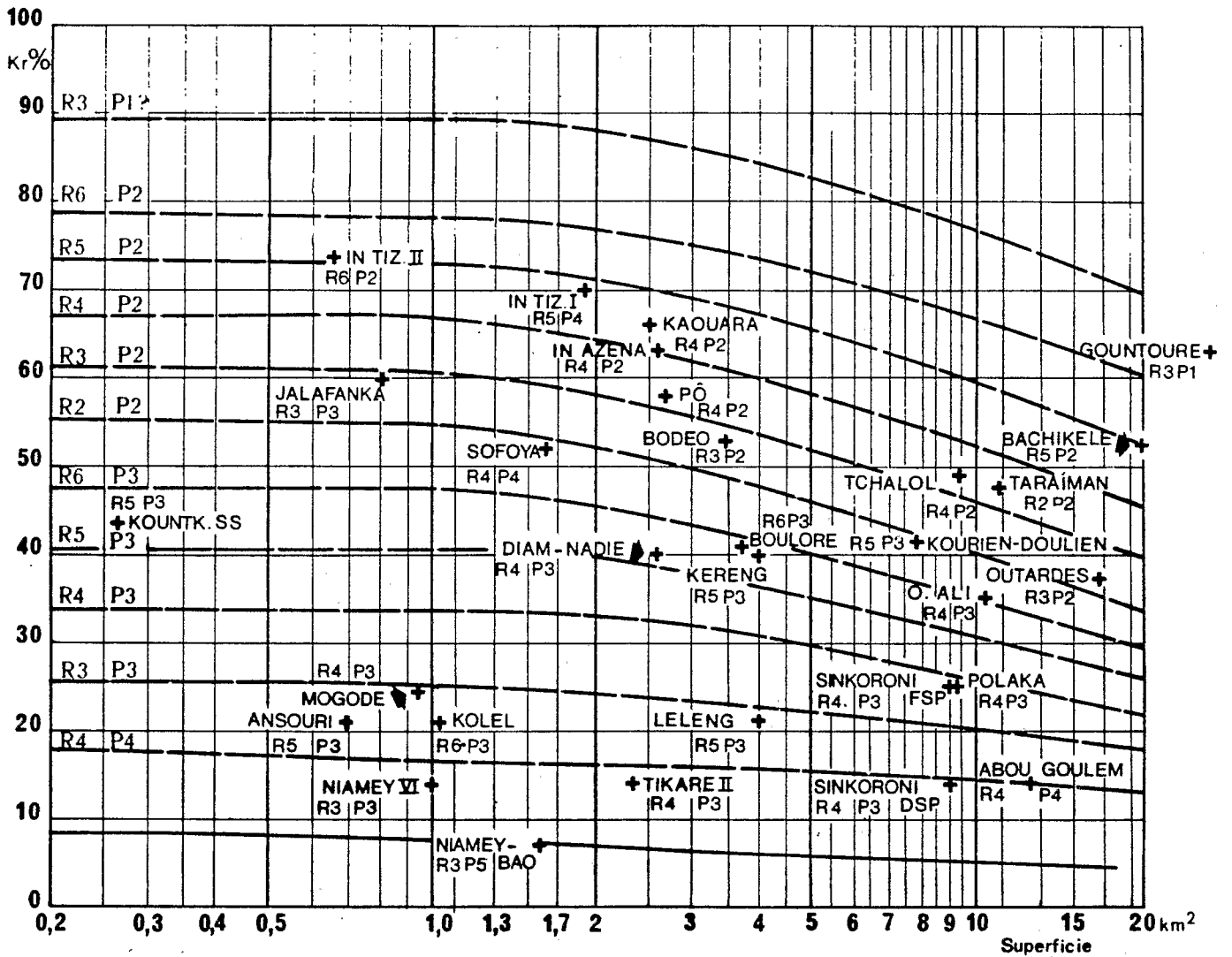


Figure 2

COEFFICIENTS DE RUISSELLEMENT POUR PRECIPITATION PONCTUELLE P = 70 MM

Tornade simple avec 75 % du corps d'averse à plus de 12 mm/h

Pour chaque tranche on détermine l'hydrogramme instantané en résultant et on superpose les hydrogrammes instantanés, décalés chacun d'un intervalle correspondant à la durée de la tranche choisie; on détermine la somme des ordonnées des hydrogrammes intéressés : le maximum de cette somme est le débit maximal décennal cherché.

Ceci suppose une bonne connaissance de l'évolution des intensités de l'averse décennale et plus particulièrement :

- * du rapport entre la hauteur correspondant au corps de l'averse (partie à forte intensité) et la hauteur totale de l'averse journalière.
- * de la durée de ce corps en fonction de cette hauteur.
- * de la position médiane du maximum d'intensité et de l'intensité correspondant à ce maximum.
- * de la forme générale de l'averse pour différentes durées du corps.

Toutes ces caractéristiques ont été déterminées respectivement par L. LE BARBE pour OUAGADOUGOU (1982) et C. BOUVIER (1985) pour NIAMEY (1985). Ces études ont été complétées par celle des données de JALAFANKA (Mare d'Oursi-Burkina) dans un site nettement plus aride que NIAMEY. Ce site n'a été observé que pendant cinq saisons et demi, mais on ne cherchait qu'une simple indication sur la tendance entre des zones relativement pluvieuses telles que OUAGADOUGOU et des zones plus arides, en se basant non plus sur un poste unique, NIAMEY (problème de site), ce qui était risqué, mais sur deux postes.

Les résultats des trois sites sont cohérents ce qui permet de les utiliser ou directement, ou avec extrapolation ou interpolation. Mais on devra faire trois remarques importantes pour les applications.

* Le corps de l'averse est limité à toutes les tranches consécutives d'intensité supérieure à 5 mm/h; cela se justifie parfaitement pour de l'hydrologie urbaine, mais la limite physique du corps apparaît comme une discontinuité bien nette en général entre tranches de fortes intensités et de faibles intensités (traîne); cette discontinuité correspondrait mieux à 10 ou 12 mm/h (peut-être un peu plus). Il en résulte, d'abord que toutes les caractéristiques du corps ainsi défini et ses variations sont moins nettes que s'il s'agissait du corps véritable et que la traîne est coupée en deux pour de nombreuses averses. Comme on le verra plus loin, ceci complique l'analyse, mais en fait pour les bassins imperméables P2 il y a ruissellement de la traîne jusqu'à des intensités de 2 ou 3 mm/h sur de très petits bassins; dans ce cas si on admettait une limite inférieure de 10 ou 12 mm/heure, il faudrait quand même considérer le ruissellement de la traîne. Au niveau de la pratique on verra qu'il n'en résulte pas de complications.

* Pour un certain nombre de caractéristiques les auteurs ont considéré les moyennes au lieu des médianes et ceci pour des distributions statistiques asymétriques et de petits échantillons, d'où des valeurs trop fortes. Il faudra donc faire un certain nombre de corrections. Il se trouve que à OUAGADOUGOU, pour la durée du corps en fonction de sa hauteur, la correction est négligeable, sauf pour des corps de plus de 70 mm. Pour NIAMEY le choix des médianes, au lieu des moyennes, réduit sensiblement la durée du corps.

En définitive après correction les trois courbes de la durée du corps (y compris celle de la mare d'Oursi) sont très voisines, ce qui est tout à fait réconfortant .

^ La différence entre averse journalière décennale et hauteur décennale du corps est notable, de l'ordre de 20 %. Les raisons en sont les suivantes : les corps des averses sont calculés pour une seule averse, alors que dans les fortes pluies journalières il y a souvent deux averses et en plus une traîne importante. Comme ceci a été dit plus haut, on devrait donc concevoir l'averse décennale avec un corps à forte intensité, des précipitations préliminaires, une traîne et une seconde averse beaucoup moins importante.

Pour en terminer avec les bases pluviographiques notons que la durée maximale limite d'une tranche d'averse, à laquelle correspond un hydrogramme instantané, est égale à peu près à la moitié du temps de montée.

Limites d'utilisation directe de l'hydrogramme instantané :

Cette étude a été faite uniquement à partir des données de OUAGADOUGOU non révisées. Elle devra être reprise après révision mais les différences seront faibles; par exemple pour une averse ponctuelle journalière de 70 mm, le corps d'averse passera de 55 à 58 mm (limite 5 mm/h), la durée de 60 à 70 minutes. Ceci ne modifiera pas sensiblement les résultats de cette sous section.

Comme pour les coefficients de ruissellement, on étudiera séparément les deux cas de bassins situés dans les régions où l'averse décennale ponctuelle est de 100 mm et de 70 mm.

On admettra que l'on peut utiliser directement l'hydrogramme instantané, chaque fois que le temps de base calculé ainsi ne diffère pas de plus de 10 % de celui obtenu en découpant le hétérogramme en tranches, sans tenir compte du ruissellement éventuel de la traîne.

Lorsque la surface du bassin croît, la hauteur de précipitation décennale décroît avec l'abattement. Dans ce cas, s'il s'agit d'une zone à averse décennale ponctuelle de 100 mm, pour calculer la durée du corps d'une averse moyenne couvrant 5 Km² par exemple, soit 90 mm, on utilisera les mêmes règles que s'il s'agissait d'une averse ponctuelle de 90 mm; l'erreur en résultant est tout à fait négligeable. On doit noter également que, dans tout ce qui suit, on admet que la pluie de hauteur journalière décennale a un corps de fréquence également décennale; ceci ne change pratiquement pas la fréquence de l'ensemble, comme un certain nombre de recoupements l'ont prouvé.

On a estimé une série de valeurs de Tm et de Tb pour différentes valeurs de Ig et des valeurs de S voisines de 1 et égales à 5, 10, 20 Km²; l'estimation a été faite pour des surfaces plus grandes dans certains cas, bien qu'il ne soit pas évident du tout que les régressions (Tm ou Tb = f (S, Ig), voir annexe 2) soient utilisables pour des bassins couvrant plus de 20 Km² (Tm et Tb désignés par Tm1 et Tb1 sont les temps instantanés, Tm2 et Tb2 sont les temps réels).

a) Pour P ponctuelle décennale 100 mm :

Ig = 3 pour S = 1 Km² Tb1 = 440' Tb2 = 445'
La limite de superficie maximale est inférieure à 1 Km²

Ig = 7 pour S = 5 Km² Tb1 = 316,5' Tb2 = 347'
La limite est de 5 Km²

Ig = 15 pour S = 30 Km² Tb1 = 213' Tb2 = 235'
La limite est voisine de 35 Km²

Ig = 25 pour S = 60 Km² Tb1 = 209' Tb2 = 232'
La limite théorique serait de 80 Km²

Ig = 60 pour S = 80 Km² Tb1 = 159' Tb2 = 232'
Pratiquement, pour aucun bassin de cette catégorie l'averse décennale n'est unitaire.

b) Pour P ponctuelle décennale 70 mm :

Ig = 3
La limite de superficie est inférieure à 1 Km²

Ig = 7 pour S = 3 Km² Tb1 = 273' Tb2 = 293'
La limite est de 3 Km²

Ig = 15 pour S = 20 Km² Tb1 = 187' Tb2 = 203'
La limite de superficie est de 20 Km²

Ig = 25 pour S = 40 Km² Tb1 = 177' Tb2 = 193'
La limite théorique serait de 40 Km²

Ig = 60 pour S = 100 Km² Tb1 = 171' Tb2 = 194'
Pratiquement, pour aucun bassin de cette catégorie, l'averse décennale n'est unitaire.

Ceci montre bien qu'une étude de crue avec décomposition en tranches s'imposait au moins jusqu'à 10 Km².

C'est cette opération complète qu'il a fallu effectuer pour l'estimation des valeurs du coefficient de pointe α . Ceci a été fait pour des averses ponctuelles décennales de 100 mm et de 70 mm. C'est de ces dernières études que l'on déduira les valeurs de Tb2 et de Tm2, voisines de celles qui viennent d'être données, que l'on utilisera dans les diagrammes d'application.

Estimation du temps de base, du coefficient de pointe et du débit maximum ruisselé.

Pour effectuer cette opération, il aurait été correct d'appliquer les hyétogrammes de précipitations décennales ponctuelles de P100 mm et P70 mm, après abattement, aux bassins représentatifs observés, en utilisant les caractéristiques de crue révisées (annexe 2).

On a préféré employer les hyétogrammes présentés ci-dessus (sous le titre

"données pluviographiques") à des séries de bassins de 3 superficies différentes 1, 5 et 10 Km² présentant des valeurs d'indices de pente et de caractéristiques d'infiltrabilité couvrant à peu près toute la gamme de bassins rencontrés dans la pratique.

Ce procédé est plus artificiel mais il met mieux en évidence l'influence des facteurs principaux. Dans la note complète, on publiera également les valeurs de Tm₂, Tb₂ et le débit décennal pour les bassins représentatifs observés. Ces valeurs moins artificielles pourront être utilisées dans des études de régressions.

L'estimation des caractéristiques (temps de base, coefficient de pointe et débit maximum) est pratiquement terminée pour les zones géographiques correspondant à la pluie décennale journalière décennale ponctuelle de 100 mm. Elle est en cours pour la pluie journalière décennale ponctuelle de 70 mm.

Quelques explications sont nécessaires :

a) Pour des bassins de 1 Km², à forte pente et ruisselant bien, le corps de l'averse décennale qui dure 85', est beaucoup trop long; en conséquence, si le volume ruisselé a bien la fréquence décennale (ce qui est intéressant pour les réservoirs), le débit maximal ainsi calculé est certainement plus faible que le véritable débit décennal. On approche celui-ci en considérant une averse dont la tranche d'intensité maximale de 15' est décennale. On ne peut pas considérer une telle tranche englobée dans un corps de fréquence décennale car la fréquence de l'ensemble qui en résulterait serait nettement inférieure à la fréquence décennale. On ne peut pas non plus supposer qu'elle soit isolée, car dans ce cas encore on tomberait sur une fréquence inférieure à la fréquence décennale. On a donc adopté une solution intermédiaire qui consiste à placer cette tranche de 15' dans un corps de période de retour de 2 ans. Le débit de pointe qui en résulte est bien le débit décennal; pour plus de 15' il est plus faible et pour moins de 15' il est plus faible également (on rappelle que le pas de temps des tranches est de 3,8'). Ce débit maximum est dans la plupart des cas celui qui doit être pris en compte pour un pont.

On constate que, dans le cas où le rapport des débits de pointe des crues résultant du corps décennal et de la tranche d'averse de 15' décennale est le plus élevé, il n'atteint même pas 1,2 et diminue lorsque S croît.

De même, pour des superficies plus grandes, on a du prendre en compte une tranche d'intensité décennale de 30' avec un corps d'averse un peu plus faible que le corps décennal. Le rapport des valeurs maximales des débits de pointe est encore plus proche de 1 que dans le cas précédent.

C'est un exemple précis, où l'on sort du principe simpliste de l'averse décennale produisant la crue décennale, et on constate que tout au moins en ce qui concerne les formes d'averses, le risque de fortes erreurs est négligeable. Il n'en serait pas de même en ce qui concerne les indices d'humidité préalables pour des bassins perméables en régions tropicales humides.

b) Toujours pour les très petits bassins, on a admis qu'une fraction de traîne après le corps d'averse limité à 5 mm/heure, ruisselle et qu'une petite averse secondaire après cette traîne ruisselait également. Ceci ne joue que sur les bassins imperméables à pente forte et la valeur maximale de l'écart entre ruissellement du corps et ruissellement total est de 7,5 %. On a d'ailleurs observé sur certains bassins représentatifs en fin de crue un ruissellement superficiel appréciable pour des intensités comprises entre 5 et 2 mm/heure. Ceci conduit à diverses estimations du temps de base T_b et du coefficient de pointe α . Dans la pratique on doit considérer le temps de base T_{b2} qui ne tient pas compte du volume total de ruissellement de la traîne au delà de 5 mm/h et le volume total de ruissellement avec lesquels on calculera le débit moyen de ruissellement. La valeur de α qui en résulte est appelée α_{th} . On a calculé également la valeur de $\alpha = \alpha_2$ qui correspond au ruissellement du corps et de la totalité de la traîne pendant le temps de base T_{b2t} (traîne comprise). On a bien mis en évidence de cette façon des valeurs de α_2 dépassant largement 3 expliquant pourquoi on a trouvé autrefois des valeurs de α de 4 à 5, pour des bassins imperméables à forte pente, sur lesquels la séparation des différentes formes de l'écoulement n'avait pas été assez étudiée.

c) Les cas de bassins imperméables avec $I_g = 60$ sont très rares et même n'existent probablement pas au Sahel. Ceci reviendrait à admettre qu'il existe dans cette région de petits massifs montagneux avec du rocher sain. On sait que dans ces massifs le rocher est presque toujours très fissuré ou décomposé en boules à la surface.

Par contre des valeurs de $I_g = 25$ pour des bassins relativement imperméables existent, et il est assez courant de trouver $I_g = 15$ et des terrains imperméables.

Mais on a étudié en détail le cas $I_g = 60$ imperméable, car il donne une limite supérieure du ruissellement.

d) Certaines valeurs seront revues si on corrige la courbe "hauteur du corps-durée du corps" de OUAGADOUGOU. Ceci concerne surtout les bassins de 1 Km². La correction d'averse serait peu importante, puisque la durée du corps d'averse décennal passerait de 85' à 80', d'où un écart de toutes façon inférieur à 10 % sur les valeurs du débit maximal ou sur le coefficient de pointe α .

On a présente dans le tableau I 4 cas extrêmes, concernant des bassins de 1 Km² et de 5 Km², en terrain imperméable à forte pente et en terrain relativement imperméable à faible pente, pour les régions où la pluie journalière décennale ponctuelle est de 70 mm. Ces derniers calculs sont basés à la fois sur les données pluviographiques révisées de NIAMEY et celles de JALAFANKA (Mare d'Oursi).

Liste des symboles utilisés dans le tableau I :

Cruces décennales des petits bassins versants de 1 à 10 Km²

Iq 60, Iq 25 etc... : indice global de pente calculé en principe comme indiqué par P. DUBREUIL en 1972 (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 It si celles-ci sont significativement plus fortes que la pente longitudinale Il : $Iq = (Il + It) / 2$ (Il correspondant à la première estimation de Iq).

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 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 graminée, sables grossiers.

S : surface du bassin en Km².

Averse décennale

24 heures : pluie journalière décennale, telle qu'elle est déduite des relevés pluviométriques classiques, inférieure de 5 % à la vraie pluie de 24 heures décennale.

Tr. de 15' : averse comportant une tranche de 15' de fréquence décennale. Sa hauteur est nettement inférieure à la précédente.

Tr. de 30' : averse comportant une tranche de 30' de fréquence décennale.

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

Pib : pluie d'imbibition en millimètres.

Hr : lame ruisselée totale en millimètres.

Im1 : temps de montée de l'hydrogramme instantané en minutes.

Tb1 : temps de base de l'hydrogramme instantané (durée du ruissellement superficiel) en minutes.

Tb2 : temps de base de l'hydrogramme réel sans le ruissellement de la traîne d'intensité inférieure à 5 mm/h (quand il se produit) en minutes.

Tb2t (sur bassins imperméables) : temps de base de l'hydrogramme réel y compris le ruissellement de la traîne d'intensité maximale 5 à 6 mm/h quand cette traîne ruisselle.

α_1 : coefficient de pointe. Rapport Q_{mr}/Q_r du débit maximum ruisselé au débit moyen ruisselé, pendant Tb2.

α_2 : coefficient de pointe. Rapport du débit maximum ruisselé Q_{mr} , au débit moyen ruisselé Q_{rt} , pendant Tb2t (le volume ruisselé comprend celui de la traîne).

α_{th} : coefficient de pointe théorique. Rapport du débit maximum ruisselé au débit moyen ruisselé total correspondant à la lame ruisselée totale, pendant le temps Tb2.

Q10 : débit de crue décennal ruisselé en m³/s.

q10 : débit spécifique, en m³/s/Km². Même débit ramené à 1 Km².

Tableau I

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	«1	«2	«th	Q10 m ³ s ⁻¹	q10 m ³ s ⁻¹
<u>Iq 60 Imp</u> 1,1 Km ² P10 = 100	24 h. Tr. de 15' Tr. de 30'	84 79 82,2	3,5 3,5 3,5	84 59,4 75	7,52 7,52 7,52	32 32 32	29 21 29	109,7 89 99,6	169,7 119 149,6	2,76 3,49 3,11	4,05 4,54 4,53	2,54 3,37 2,93	35,6 41,1 40,6	32,4 37,4 36,9
<u>Iq 60 Imp</u> 5 Km ² P10 = 90	24 h. Tr. de 15' Tr. de 30'	77,5 73 75,8	4,5 4,5 4,5	69,8 50,3 62,2	11,2 11,2 11,2	50,4 50,4 50,4	32 20 30	115 100 108	155 120 138	2,59 3,39 2,81	3,49 3,99 3,51	2,55 3,27 2,72	129 139 131	25,8 27,8 26,2
<u>Iq 60 Imp</u> 10 Km ² P10 = 86	24 h. Tr. de 15' Tr. de 30'	72,7 67,7 70,8	5,5 5,5 5,5	62,5 44,5 55,5	14 14 14	65 65 65	33 25 32	122 106 118	142 116 129	2,63 3,03 2,91	3,02 3,29 3,16	2,59 3,01 2,89	221 211 227	22,1 21,1 22,7
<u>Iq 60 R. Imp</u> 1,1 Km ²	24 h. Tr. de 15'	51,5 48,2	8 8	51,5 37,6	7,52 7,52	32 32	27 18	101 80				2,78 3,50	26,0 30,1	23,6 27,4
<u>Iq 60 R. Imp</u> 5 Km ²	24 h. Tr. de 15' Tr. de 30'	44,5 40,6 43	9 9 9	40,1 27,9 35,3	11,2 11,2 11,2	50,4 50,4 50,4	31 20 26	107 90 100				2,70 2,80 2,93	84 78,1 86,2	16,8 15,6 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. Tr. de 15'	25 23	15 15	25 17,3	7,52 7,52	32 32	21 14,5	85 68				2,54 3,36	13,7 15,6	12,5 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
<u>Iq 25 Imp</u> 1,1 Km ²	24 h. Tr. de 15'	78 73,6	3,8 3,8	78 57,4	15,6 15,6	58 58	37 27	131 110	171 150	2,83 3,06	3,53 4,06	2,69 2,91	29,3 27,9	26,6 25,4
<u>Iq 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>Iq 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>Iq 25 R. Imp</u> 1,1 Km ²	24 h. Tr. de 15'	43,5 41,3	9 9	43,5 32,2	15,6 15,6	58 58	35 23	122 101				2,79 3,12	18,3 18,2	16,6 16,5
<u>Iq 25 R. Imp</u> 5 Km ²	24 h.	37	10	33	23,7	87,5	42	136				2,75	55,6	11,1

Tableau I (suite)

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 %	P1b mm	Hr mm	Tm1 min	Tb1 min	Tm2 min	Tb2 min	Tb2t min	ε1	ε2	εth	Q10 m ³ s-1	q10 m ³ s-1 k-2
<u>Iq 25 R. Imp</u> 10 Km ²	24 h.	35	10,5	30,1	30	109	44	148				2,57	87	8,7
<u>Iq 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>Iq 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>Iq 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>Iq 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>Iq 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>Iq 15 R. Imp</u> 10 Km ²	24 h.	29	12	24,9	46	149	54	180				2,58	59,6	6,0
<u>Iq 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>Iq 15 P</u> 10 Km ²	24 h.	17,5	18	15,1	46	149	50	172				2,48	36,9	3,7
<u>Iq 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>Iq 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>Iq 7 Imp</u> 10 Km ²	24 h.	53		45,6	85,2	394	85	394				2,5 (1)	48,3	4,8
<u>Iq 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>Iq 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>Iq 7 R. Imp</u> 10 Km ²	24 h.	22		18,9	85,2	394	85	394				2,5 (1)	20	2,0

Tableau I (suite)

CRUES DECENNALES DES PETITS BASSINS VERSANTS DE 1 à 10 Km²Averse de 24 heures décennale ponctuelle 100 mm

Type de bassin	Averse décennale	Kr %	P _{1b} mm	Hr mm	Tm ₁ min	Tb ₁ min	Tm ₂ min	Tb ₂ min	Tb _{2t} min	«1	«2	«th	Q ₁₀ m ³ s ⁻¹	q ₁₀ m ³ s ⁻¹ k-2
<u>Iq 3 Imp</u> 1 Km ²	24 h.	59,5		59,5	125	457	125	457				2,5	5,4	5,4
<u>Iq 3 Imp</u> 5 Km ²	24 h.	52		46,8	226	730	226	730				2,5	13,4	2,7
<u>Iq 3 Imp</u> 10 Km ²	24 h.	46		39,6	294	885	294	885				2,5	18,7	1,9
<u>Iq 3 R Imp</u> 1 Km ²	24 h.	19 ?		19	125	457	125	457				2,5	1,72	1,7
<u>Iq 3 R Imp</u> 5 Km ²	24 h.	15 ?		13,5	226	730	226	730				2,5	3,85	0,77
<u>Iq 3 R Imp</u> 10 Km ²	24 h.	14 ?		12	294	885	294	885				2,5	5,65	0,56

Averse journalière décennale ponctuelle 70 mm

<u>Iq 60 Imp</u> 1,1 Km ² P ₁₀ = 70	24 h.	77,7	3,5	54,4	7,52	32	28	93	126	2,6	3,38	2,46	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>Iq 60 Imp</u> 5 Km ² P ₁₀ = 63	24 h.	71,7	4,8	45,2	11,2	50,4	31	103	118	2,57	2,87	2,51	91,7	18,3
<u>Iq 7 R Imp</u> 1 Km ² P ₁₀ = 70	24 h.	24,5	12,5	17,1	39,7	204	56	241				2,60	3,08	3,1
<u>Iq 7 R Imp</u> 5 Km ² P ₁₀ = 63	24 h.	21,5	14	13,6	66,5	317						2,5 (1)	8,92	1,78

1) Calculé directement sans décomposer l'averse en tranches; l'averse décennale est unitaire dans ce cas, et « est pris égal à 2,5 comme pour les hydrogrammes instantanés.

Pour le moment on peut utiliser les données du tableau I comme suit. Les opérations à effectuer sont les suivantes :

- A) Visiter le bassin.
- B) Consulter le questionnaire et en déduire les conséquences.
- C) Déterminer la hauteur journalière de précipitation décennale P10, correspondant au bassin dont on veut calculer la crue. Ne recourir à la régression P10 - Pluie moyenne annuelle que si on ne peut pas faire autrement.
- D) Grâce aux diagrammes donnés par G. VUILLAUME, déterminer le coefficient d'abattement K et multiplier P10 par K, pour obtenir la pluie moyenne P10;
- E) Déterminer la valeur de Ig, corrigée s'il y a lieu par la pente transversale ($I_{gcor} = I_g/2 + I_t/2$). On peut en trouver une évaluation approximative par des moyens très sommaires (Ig = 60 correspond à la montagne, Ig = 25 à des collines à pentes pas trop raides, etc...).
- F) Essayer, d'après les états de surface (à comparer avec les caractéristiques des bassins données dans l'annexe 2) et la superficie relative qu'ils couvrent, de se faire une idée de la classe d'infiltrabilité (Imp, R. Imp ou P très perméable). On sait que, sans répertoire des aptitudes au ruissellement, ce classement est vraiment très délicat.
- G) Suivant la valeur de P10 (valeur ponctuelle) et les catégories déterminées en E) et F), déterminer la valeur du coefficient de ruissellement Kr 10 pour la surface du bassin en interpolant entre les deux valeurs de Kr 10 données par les courbes correspondantes des deux diagrammes P100 mm et P 70 mm ou en extrapolant s'il y a lieu.
- H) La lame ruisselée est : $Hr = \overline{P10} \times Kr 10$.
- I) Déterminer Tb2 en interpolant entre les données du tableau I. Le débit moyen ruisselé est égal à $(Hr \times 10^3) / Tb2$; Hr est en millimètres et Tb2 en secondes.
- J) Multiplier ce débit moyen ruisselé par $\alpha = 2,6$ (sauf si le questionnaire indique une réduction ou une majoration de x). On atteint ainsi le débit maximum ruisselé décennal sauf pour les bassins imperméables (voir tableau I, tranches de 15' et 30') pour lesquels une légère majoration est nécessaire).
- K) Pour tracer l'hydrogramme, déterminer le temps de montée Tm2 (tableau I). Ne pas oublier pour tracer celui-ci que la forme de l'hydrogramme s'écarte nettement de celle du triangle.

Résultats

Les valeurs de temps de montée sont assez cohérentes malgré la complexité relative des opérations qui permettent de le trouver.

Pour une superficie et un indice de pente donnés, Tb_2 varie légèrement avec l'infiltrabilité, par suite de la diminution de la durée de la partie du corps d'averse qui ruisselle.

Pour $P_{10} = 100$ mm, Tb_2 varie de 110' à 85'; pour $P_{10} = 70$ mm sa valeur maximale est de 96'. Tb_2 varie relativement peu avec la superficie du bassin versant, la durée du corps restant importante vis à vis de Tb_1 ; pour $I_g = 60$, Imperméable, Tb_2 passe de 110' à 122', lorsque S passe de 1 à 10 Km^2 .

Suivant les valeurs qui seront trouvées pour $P_{10} = 70$ mm, on utilisera dans la note pratique qui sera mise au point une courbe unique pour représenter Tb_2 en fonction de S , ou deux courbes, ou même peut être quatre courbes.

Pour le coefficient de pointe α , ou plus précisément α_{th} (le seul qu'il soit possible d'utiliser au niveau opérationnel), il semble possible d'admettre un coefficient constant égal à 2.6 qui ne conduirait qu'à des écarts minimes avec les valeurs du tableau I (pour lesquelles on doit considérer qu'un écart de 0,1 est tout juste significatif). Cette possibilité d'utiliser une valeur constante confirme ce qui avait été déjà constaté avec les valeurs de α pour l'hydrogramme instantané. Bien entendu il faudrait prendre des valeurs de α plus élevées pour les débits maximaux correspondant aux tranches de 15' décennale et 30' décennale.

Certains débits spécifiques paraîtront élevés. Cependant on connaît dans le monde un bon nombre de valeurs dépassant 35 $m^3/s/Km^2$ pour des bassins versants de 1 à 3 Km^2 . Le record observé est actuellement de 100 $m^3/s/Km^2$ mais pour des régimes pluviométriques différents de celui du Sahel et des fréquences inférieures à la fréquence décennale.

Tout ce qui précède fera l'objet d'une note technique, où beaucoup plus de détails seront donnés sur l'estimation des résultats présentés dans le tableau I.

Quelques indications pour l'utilisation de ces premières données pour le calcul des crues décennales pour lequel $\alpha = 2$

On peut passer du débit maximum ruisselé au débit maximum écoulé en ajoutant l'écoulement intermédiaire. On trouve quelques éléments pour cette estimation dans les annexes de l'article du Cahier d'hydrologie de l'ORSTOM (RODIER, à paraître). Cette correction est de faible importance et assez souvent négligeable.

On peut aussi à la rigueur mettre au point des régressions directes entre les débits maximaux des crues décennales du tableau I et les divers facteurs conditionnels et utiliser ces régressions; cette méthodologie nous paraît plus risquée que l'estimation "pas à pas", décrite plus haut, qui permet des contrôles et des corrections à chaque étape.

Inutile de dire que la méthodologie proposée après la synthèse des bassins représentatifs de l'ORSTOM, pourra être différente. En attendant il convient de poursuivre la révision des données pour les bassins versants de superficie dépassant 10 Km^2 .

IV - ESTIMATION DES APPORTS ANNUELS DES PETITS BASSINS VERSANTS SAHELIENS

En 1975, RODIER a utilisé la totalité des informations disponibles pour la mise au point de courbes de distributions statistiques des écoulements annuels sur la plupart des types de bassins versants rencontrés dans le Sahel. Après une présentation de la méthodologie employée, nous étudierons comment les observations faites depuis cette date complètent ce travail et permettent d'étudier l'influence de la sécheresse sur cette variable hydrologique. Nous n'aborderons dans ce chapitre, que le cas des petits bassins.

1 - Méthodologie d'étude de l'écoulement annuel (RODIER, 1975)

La méthodologie employée s'appuie sur les résultats de deux études qui sont présentés dans le document de 1975.

* L'étude des courbes de distribution des précipitations annuelles.

Par la méthode des stations-années, RODIER regroupe les stations qui ont des valeurs médianes proches (de 450 à 500 mm, par exemple). Pour une valeur médiane donnée, l'échantillon est suffisamment important pour obtenir une courbe de distribution statistique des précipitations annuelles, significative pour toutes les périodes de retour jusqu'à la valeur décennale.

* L'utilisation d'un modèle simplifié élaboré par G. GIRARD sur deux petits bassins versants sahéliens, qui ont des comportements hydrologiques très différents, (KADIEL en Mauritanie et ABOU GOULEM au Tchad). Une fois ce modèle correctement calé sur ces bassins, il a été possible de simuler de longues séries d'écoulement annuel à partir de longues séries pluviométriques. Les échantillons ainsi obtenus étaient suffisants pour tracer des courbes de distribution statistique des apports annuels sur les deux bassins.

Pour s'affranchir du grand nombre de variables qui influencent l'écoulement annuel, RODIER a basé sa méthode sur le principe des bassins-types : quelques bassins déjà observés sont décrits en fonction de leur aptitude à l'écoulement, et sur chacun de ces bassins est proposé un faisceau de courbes de distribution de l'écoulement en fonction des valeurs de la pluie médiane. Ces courbes ont été ajustées en comparant l'écoulement observé sur le bassin-type à celui des deux bassins modélisés, KADIEL et ABOU GOULEM. La variation en fonction de la pluie médiane est obtenue à partir des courbes de distribution des précipitations annuelles.

Pour appliquer cette méthode à un bassin non étudié, on compare le bassin aux bassins-types décrits dans la note. On choisit ainsi le bassin-type qui a les caractéristiques les plus proches (principalement le type de sol, mais aussi la pente, la densité de drainage ...). On obtient ensuite la courbe de distribution de l'écoulement annuel sur le bassin choisi, en utilisant celle du bassin-type pour une pluviométrie médiane annuelle correspondant à la région d'étude.

2 - Estimation de l'écoulement annuel avec actualisation des données jusqu'en 1984

La méthodologie de RODIER (1975) est la seule proposée pour estimer les apports annuels avec les données disponibles sur les petits bassins versants sahéliens. Mais il faut vérifier la validité des résultats obtenus lorsqu'on actualise les données avec des observations récentes. Cette vérification peut se faire à chacune des trois étapes de la méthode :

Distribution des précipitations annuelles :

Pour vérifier la validité des abaques proposées par RODIER, nous avons recalculé la distribution des pluies annuelles pour les stations ayant une pluie médiane comprise entre 450 et 500 mm. Nous avons choisi les mêmes stations que RODIER, c'est-à-dire, DEHRA et MATAM au SENEGAL, FILINGUE, MADAOUA, TERA, TILLABERY et ZINDER au NIGER.

Le tableau suivant permet de comparer les résultats :

Fréquences expérimentales	Résultats RODIER Médiane: 450-500mm	Résultats actualisés à 1984	Résultats RODIER Médiane: 400-450mm
0,95	264	248	236
0,90	320	280	259
Médiane	480	467	420
0,10	677	645	602
0,05	738	711	681

On peut remarquer que la valeur médiane diminue de 480 à 467 mm. Il y a diminution de toutes les valeurs, mais les nouvelles courbes avec les observations récentes se situent bien entre les 2 courbes de RODIER tracées pour des pluies médianes de 450 à 500 mm et 400 à 450 mm.

En conséquence, on peut considérer que les courbes de distribution des précipitations annuelles de RODIER restent valables pour les observations récentes, mais il faut les utiliser pour une station donnée, avec une valeur médiane plus faible.

Simulation de longues séries d'écoulement annuel :

Ce travail effectué sur les bassins de KADIEL et ABOU GOULEM pourrait être refait en actualisant les précipitations jusqu'en 1984. Mais il faut remarquer que, comme nous l'avons souligné dans le premier chapitre, la sécheresse récente a modifié les conditions d'écoulement, et en particulier les aptitudes au ruissellement.

Le calage d'un modèle, à partir des observations pluie-débit sur le bassin de KADIEL en 1964-67, ne permettra pas de simuler correctement les écoulements qui ont eu lieu sur ce bassin entre 1975 et 1985. On se limitera donc à une remarque d'ordre qualitative : les écoulements annuels sur KADIEL ont été simulés à partir des stations pluviométriques de MADAOUA, M'BOUT et KANKOSSA avec des observations jusqu'en 1973. Pour la station de MADAOUA, sur sept valeurs annuelles de pluies observées depuis cette date, six sont inférieures à la valeur médiane. On peut donc prévoir une légère diminution du coefficient d'écoulement médian sur le bassin de KADIEL.

Courbes de distribution des écoulements pour différents types de bassins sahéliens

Ces courbes ont été ajustées à partir des données disponibles en 1975 sur l'ensemble des petits bassins versants au SAHEL. Peu de bassins ont été observés depuis cette date. Il n'y a donc pas assez d'éléments nouveaux qui permettraient de recalculer ces courbes. De plus, les valeurs médianes de RODIER, appliquées aux bassins versants de la Mare d'OURSIS (CHEVALLIER et al., 1985) donnent des résultats cohérents pour les sept bassins.

En conclusion, on peut souligner que le document de 1975 reste utilisable après actualisation avec les observations récentes. Ce travail permet d'estimer une courbe de distribution statistique des écoulements annuels sur un bassin non observé, à partir de celle d'un bassin-type décrit par RODIER.

Mais la courbe de distribution des écoulements ne suffit pas pour un aménagement. Il est nécessaire de la compléter par une étude de la chronologie des écoulements. Un exemple illustre cette remarque :

Supposons un barrage à dimensionner dans la région de MATAM au SENEGAL et supposons, très grossièrement que les fréquences des écoulements annuels correspondent aux fréquences des pluies annuelles. De 1972 à 1984 la pluie annuelle à MATAM (donc, d'après notre hypothèse, l'écoulement annuel sur le bassin) n'a jamais atteint la valeur médiane. Un barrage qui aurait été dimensionné pour cette valeur, n'aurait jamais été complètement rempli durant cette période de treize ans.

Cet exemple, simpliste, illustre l'intérêt d'une étude des risques de défaillance, lorsqu'un aménagement est prévu. Il est d'autant plus important de faire cette étude de risque, que la durée de vie prévue pour l'ouvrage est courte. Pour la mener à bien, le seul outil fiable serait un modèle de simulation de fonctionnement d'ouvrage. Malheureusement les données nécessaires à ce type de modèle sont très rarement disponibles sur les petits bassins. Mais une simple étude, d'ordre qualitative, des pluies à une station proche de l'aménagement prévu peut amener certaines conclusions sur ce risque de contre-performance de l'ouvrage prévu.

CONCLUSION

Le présent travail a permis de mieux cerner les méthodologies utilisables sur les petits bassins sahéliens, pour déterminer les caractéristiques de crue et les apports annuels compte tenu des observations récentes.

Pour les crues, la révision des données sur les bassins observés, dans le cadre du Programme FORCRUSA de l'ORSTOM, a permis de donner des résultats valables pour des bassins inférieurs à 10 km². La révision des données sur des bassins plus grands est en cours.

De plus, des recommandations ont été faites, quelle que soit la méthodologie employée, pour mettre en garde les aménageurs vis-à-vis de bassins très particuliers.

Une des conclusions importantes est que la période de sécheresse récente ne doit pas conduire à une révision en baisse des caractéristiques de crue.

Pour les apports, la méthodologie proposée par RODIER en 1975 reste valable en utilisant les données récentes. Mais, du fait de la répétition des faibles valeurs de pluie annuelle au cours de la sécheresse, les courbes de distribution statistiques ne suffisent pas pour dimensionner des ouvrages : il faut y associer une étude des risques de défaillance sur des séquences pluviométriques ou hydrologiques pluriannuelles.

BIBLIOGRAPHIE

- ALBERGEL J., VALENTIN C. (1986)
Sahélisation d'un petit bassin versant soudanien KOGNERE-BOULSA au BURKINA-FASO. Colloque NORDESTE-SAHÉL. IHEAL. Université PARIS III. 14 p.
- ALBERGEL J. (à paraître)
Evolution de la pluviométrie en AFRIQUE soudano-sahélienne. Exemple du BURKINA-FASO. Colloque CIEH DAKAR. Normes hydrologiques appliquées à la conception d'ouvrages hydrauliques au SAHEL et en AFRIQUE. 19 p.
- BRUNET-MORET Y. (1968)
Etude générale des averses exceptionnelles en AFRIQUE OCCIDENTALE. Rapport de synthèse. ORSTOM, Service Hydrologique, PARIS. 17 p., 2 fig., 12 cartes h. t.
- BOUVIER C. (1985)
Etude du ruissellement urbain à NIAMEY. Rapport général. Tome 3 : interprétation des données. CIEH - Mission ORSTOM au NIGER. 106 p.
- CHEVALLIER P., CLAUDE J., POUYAUD B. et BERNARD A. (1985)
Pluies et crues au SAHEL. Hydrologie de la Mare d'OURSIS (1976-1981). ORSTOM PARIS. 251 p.
- DUBREUIL P. L., CHAPERON P., GUISCAFRE J. et HERBAUD J. (1972)
Recueil des données de base des bassins versants représentatifs et expérimentaux. Années 1951-1969. ORSTOM PARIS. 916 p.
- DUBREUIL P. L. (1985)
Review of field observations of runoff generation in the Tropics. Journal of Hydrology. 80 : 237-264
- GIRARD G. (1975a)
Application du modèle à discrétisation spatiale au bassin versant de l'Oued GHORFA (MAURITANIE). Cah. ORSTOM. Série Hydrol. Vol. XII n° 3 : 167-188.
- GIRARD G. (1975b)
Les modèles hydrologiques pour l'évaluation de la lame écoulée en zone sahélienne et leurs contraintes. Cah. ORSTOM. Série Hydrol. Vol. XII n° 3 : 189-221.
- PUECH C. et CHABI-GONNI D. (1984)
Méthode de calcul des débits de crue décennale pour les petits et moyens bassins versants en AFRIQUE de l'Ouest et centrale. CIEH OUAGADOUGOU. 91 p.
- LE BARBE L. (1982)
Etude du ruissellement urbain à OUAGADOUGOU. Essai d'interprétation théorique. Recherche d'une méthode d'évaluation de la distribution des pointes de crues à l'exutoire des bassins urbains. Cah. ORSTOM. Série Hydrol. Vol. XIX n° 3 : 135-204.

RODIER J. et AUVRAY C. (1965)

Estimation des débits de crue décennale pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en AFRIQUE occidentale. ORSTOM-CIEH PARIS. 30 p.

RODIER J. (1975)

Estimation de l'écoulement annuel dans le SAHEL tropical africain. Travaux et documents n° 46. ORSTOM PARIS. 121 p.

RODIER J. (1984)

Evaluation hydrométéorologique des critères de conception des ouvrages de drainage routiers et des évacuateurs de crues des petits barrages dans la région du SAHEL. Projet UNSO/RAF/83/504 GENEVE. 43 p.

RODIER J. (1984-1985)

Caractéristiques des crues des petits versants au SAHEL. Cah. ORSTOM Série Hydrol. Vol. XXI n° 2

VUILLAUME G. (1974)

L'abattement des précipitations journalières en AFRIQUE intertropicale. Variabilité et précision du calcul. Cah. ORSTOM. Série Hydrol. Vol. XI n° 3

ANNEXE 1

ESTIMATION DES DEBITS DE CRUES DECENNALES DES PETITS BASSINS VERSANTS AU SAHEL.

Ebauche d'un questionnaire préliminaire (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, un répertoire est prévu afin d'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 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. Dans les deux cas, il est impossible de tenir compte de tous les facteurs secondaires d'où des erreurs notables lorsque ceux-ci prennent des valeurs extrêmes, faciles, heureusement, à identifier sur le terrain.

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 le caractère plus ou moins dégradé du réseau hydrographique.

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.

La présentation synthétique de ce qui suit doit être considérée comme tout à fait provisoire.

I - Classification selon le type d'averse dominant

- 1a) Le bassin est situé dans la bande de 10-20 km qui borde l'Océan. Les hyétogrammes de pluie à considérer sont beaucoup plus longs et plus complexes qu'à l'intérieur (P10 de l'ordre de 200 mm).
- 1b) Le bassin est situé à l'intérieur des terres. Les averses sont des tornades classiques. Les formes les plus simples et les plus usuelles ont été données par BRUNET-MORET (1968) et aussi publications ruissellement urbain (LE BARBE, 1982 et BOUVIER, 1985)

II - Classification selon la superficie

- 2a) La superficie est inférieure à S_0 .
On peut utiliser l'hydrogramme unitaire avec la méthodologie de la note de 1965, à condition de découper l'averse décennale ou annuelle en tranches de durée inférieures ou égales à $T_m/2$ (ou utiliser directement T_b corrigé et α corrigé où $\alpha = Q_{max} / Q_{moy}$).
- Pour $I_g \text{ corr}=3$ $S_0=0,5 \text{ Km}^2$
(1) $I_g \text{ corr}=7$ $S_0=5 \text{ Km}^2$
 $I_g \text{ corr}=15$ $S_0=30 \text{ Km}^2$
 $I_g \text{ corr}=25$ $S_0=60 \text{ Km}^2$
 $I_g \text{ corr}=60$ $S_0=150 \text{ Km}^2$
- 2b) La superficie du bassin est comprise entre S_0 et 100-120 km^2 . Il y a un léger avantage pour le moment à utiliser la méthode de l'hydrogramme unitaire (avec le corps d'averse tel qu'il est) et la méthodologie proposée dans la note 1965 (RODIER - AUVRAY).
- 2c) La superficie du bassin est comprise entre 100-120 et 200 Km^2 . La méthodologie de l'hydrogramme unitaire n'est plus applicable, mais on peut à la rigueur utiliser la même méthodologie que plus haut en extrapolant les résultats de 100 à 200 Km^2 ou utiliser des régressions multiples.
- 2d) La superficie du bassin est comprise entre 200 et 600 Km^2 . Les méthodes de régressions multiples sont les seules à donner des résultats, mais il existe peu de données pour les établir; les données des réseaux peuvent apporter une certaine aide.

(1) $I_g \text{ corr} = I_g \text{ corrigé}$ s'il y a lieu par la pente latérale moyenne.

III - Classification selon certaines caractéristiques du réseau hydrographique

- 3a) La dégradation hydrographique est nulle ou très faible. Suivre une des méthodes proposées en 2, sous réserve de ce qui suit.
- 3a1a) Le bassin est constitué de deux parties: amont et aval raccordées par un étroit pédoncule. 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.
- 3a1b) Sans en arriver au cas extrême 3a1a, le réseau hydrographique montre deux ou plusieurs ensembles de tributaires laissant présager un décalage significatif de leurs apports (bassins allongés avec tributaires d'importances inégales). Si on suit la méthodologie de l'hydrogramme unitaire, il sera bon de prendre $\alpha = 2$. Pour d'autres méthodologies, le débit maximal obtenu sera à réduire de 20 %.
- Temps de base à majorer de x %.
- 3a1c) 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.
- 3a1d) Sans présenter les caractéristiques extrêmes du 3a1c, la forme du bassin est plus allongée (indice de compacité $I_c \geq 1,30$). Si on suit la méthodologie de l'hydrogramme unitaire, majorer le temps de base de x %, ou réduire de x % le débit maximum obtenu pour des conditions moyennes.
- 3a1e) Le réseau présente une zone marécageuse à l'aval ou à l'amont du bassin. voir 3a2a ou 3a2b ou 3a2c.
- 3a1f) 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 nette dans sa partie aval avec formation d'un marécage temporaire, d'une plaine d'inondation ou même d'un lac temporaire.
- 3a2b) La partie plate du bassin, très perméable sans trace de drainage, est à l'amont.
- 3a2c) La partie plate du bassin imperméable et assez bien ou bien drainée, est à l'amont.
- 3a2d) La partie plate du bassin, imperméable et mal drainée, est à l'amont.
- 3a3a) Le bassin comporte une zone très perméable à l'amont du tributaire principal ou des tributaires secondaires (sables éoliens, amas de blocs cristallins, de grès ou de schistes, cuirasse ferrugineuse démantelée).
- 3a3b) Le bassin est couvert de blocs (forte rugosité) et cependant, il y a un certain ruissellement.
- 3a4a) Zones cultivées dépassant plus de 20 % de la superficie.
- T_m et T_b doivent être majorés de x % suivant l'importance de la zone à faible pente (par exemple Tikaré II). Pour d'autres méthodologies le débit maximum obtenu pour un cas sans rupture de pente est à réduire de x %.
- voir 3a3a
- Pas de changement par rapport aux méthodologies habituelles.
- voir 3b.
- 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 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 % (bassin de Kolel).
- K_r est en général plus faible pour cette zone que sur sol nu. Voir les quelques exemples donnés dans le répertoire des aptitudes au ruissellement.

- 3a4b) Abords du lit à l'aval couverts d'une végétation arbustive dense.
- Tant que cette végétation persiste, le débit maximum des crues pourrait être divisé par deux, mais cette sorte de végétation a si peu de chance de se maintenir, qu'il vaut mieux faire comme si elle n'existait pas pour le calcul des fortes crues.
- 3a4c) Mesures de conservation des sols bien réalisées sur le terrain.
- 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.
- 3a5a) Ecoulement perturbé par un ouvrage quelcas le plus courant est celui d'une piste recoupant le bassin.
- Vérifier si sous la piste il existe une buse ou un pont, le débit maximum passant 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 pas trop 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 (tributaires du Lac de Bam, Paspanga en 1974).
- 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.

3b4) Bassin fortement dégradé.

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

ANNEXE 2

CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES DES TRES PETITS BASSINS

Nous ne présenterons ici que les principaux résultats de la révision des caractéristiques de crue des très petits bassins. L'ensemble de ce travail est publié dans un article des Cahiers de l'ORSTOM (RODIER, à paraître).

Données géographiques des bassins.

Les caractéristiques géomorphologiques ayant été revues par P. DUBREUIL et al. (1972) et les données des bassins ultérieurs ayant été analysées suivant le même principe, on s'est contenté dans ce domaine d'apporter une légère modification à l'indice global de pente : on rappelle que cet indice est la pente en m par Km d'un rectangle ayant même superficie et même périmètre que le bassin (rectangle équivalent), après élimination des valeurs extrêmes au sommet et à la partie basse couvrant des superficies relativement faibles, ces valeurs extrêmes risquant de donner une valeur exagérée de l'indice de pente.

Les périmètres étaient déjà stylisés pour ne pas augmenter exagérément le périmètre donc diminuer la pente, mais on a dû dans la révision s'imposer une condition supplémentaire : la longueur du périmètre du rectangle équivalent ne devait pas excéder sensiblement la longueur du plus long talweg, ce qui a conduit à styliser davantage. En outre, l'indice I_g ne rendant pas suffisamment compte des pentes latérales, nous avons adopté, chaque fois que celles-ci étaient nettement plus fortes que la pente longitudinale, un indice corrigé :

$$I_{gcorr.} = I_g/2 + I_t/2$$

I_t valeur moyenne approximative des pentes transversales.

Ces modifications diminuent très sensiblement la dispersion des points dans l'étude des coefficients ou caractéristiques influencées par la pente.

Sans répertoire des aptitudes au ruissellement, il n'a été possible de faire que très peu de chose pour améliorer nos connaissances sur l'infiltrabilité; nous n'avons effectué qu'un meilleur classement dans les classes P_i que nous espérons bien avoir à utiliser pour la dernière fois.

On a repris ici la définition de ces indices car faute du répertoire on a dû les utiliser dans les documents dont il sera question plus loin.

P1 rigoureusement imperméable suppose une surface imperméable et plane (aire de ruissellement en béton non fissurée et bien faite); on ne rencontre dans la nature que des cas intermédiaires P2 (P1).

P2 est imperméable (même s'il s'agit d'argiles avec des fentes de retrait) mais avec 10 à 20 % de surface relativement perméable.

P3 est relativement imperméable avec généralement un mélange de surfaces perméables et imperméables.

P4 est un bassin assez perméable avec quelques petites surfaces qui ruissellent mieux.

P5 est très perméable : cuirasses ferrugineuses démantelées, éboulis, certains sables éoliens ou sables sans pellicule imperméable et un peu de végétation.

Le tableau II indique les caractéristiques de situation et les données physiques concernant les bassins révisés.

Ig est l'indice de pente parfois révisé par suite d'un contour plus stylisé du périmètre, et dans ce cas il est différent de celui donné par DUBREUIL. Igcor correspond aux cas où il a été nécessaire de faire une nouvelle correction pour tenir compte de la pente latérale.

Le substratum n'a souvent qu'un intérêt limité, car la diversité des formations superficielles oblitèrent complètement l'influence de ce substratum. Il est codifié comme suit :

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 : Ils ont été "définis" plus haut.

Révision du coefficient de ruissellement pour la crue décennale et caractéristiques de l'hydrogramme instantané.

Sur ces bassins on a procédé à la détermination des temps de montées, temps de base, coefficients de pointe de l'hydrogramme instantané (Q_{max}/Q_{moy}) et coefficients de ruissellement.

Ces caractéristiques ont été reprises à partir des hydrogrammes et des hyétogrammes des rapports originaux ou des archives en suivant exactement la même méthodologie sur tous les bassins. Cette méthodologie est décrite dans l'article des Cahiers Hydrologiques de l'ORSTOM.

Les coefficients de ruissellement de l'averse décennale ont été réévalués soit à partir d'une analyse sommaire de l'ensemble pluie-débit soit après examen et si nécessaire correction de la partie supérieure des courbes donnant la lame ruissellée ou le coefficient de ruissellement, en fonction de la hauteur de précipitations quand elles existaient.

On signale un point important de ces études : on a recherché ce qui pourrait être le maximum de ruissellement. L'élément principal de cette recherche a été une pluie tunisienne tombant en hiver sur un bassin imperméable avec une première partie du hyétogramme voisine de 100 mm en 24 heures dont la forme était analogue à celle des hyétogrammes approchant 100 mm observés au Sahel. On est arrivé à la conclusion qu'il était peu réaliste de prévoir des coefficients dépassant beaucoup 75 % par rapport à la pluie relevée dans le pluviomètre Association.

La raison essentielle en est que dans le cas le plus fréquent la pluie est suivie d'une traîne importante à faible intensité qui ruisselle assez peu et qu'elle est précédée et suivie d'averses préliminaires ou secondaires qui ne ruissellent pas à 100 % (pluie dans le pluviomètre Association) et plus comme c'est le cas pour les plus fortes intensités de l'averse.

Toutes les caractéristiques obtenues sont présentées dans le tableau III.

Comme cela a été souligné dans le chapitre 3 paragraphe 4 du présent article, les coefficients de ruissellement ont été déterminés dans trois cas : averse décennale journalière correspondant à la situation du bassin, averses décennales ponctuelles de 100 mm journalière et de 70 mm journalière.

Les temps de montée et de base dépendent surtout de la superficie et de la pente. On peut considérer que l'écoulement à la station de mesure depuis la ligne de partage des eaux correspond à la succession d'un ruissellement en nappe sur une longueur qui considérée du plan statistique est une constante et de l'écoulement beaucoup plus rapide dans un réseau hydrographique.

On a utilisé d'après ces bases physiques, l'expression T_b ou $T_m = a \sqrt{S - S_0} + b$ ou de façon plus générale de l'expression $a (S - S_0)^n + b$ avec $n < 0,5$.

On aboutit ainsi par ajustement avec les points représentatifs du tableau III aux régressions suivantes pour T_m :

$$I_{gcor} = 60 \text{ (R6)} \quad T_m = 3,02 \cdot (S - 0,1)^{0,5} + 4,5$$

$$I_{gcor} = 25 \text{ (R5)} \quad T_m = 6,64 \cdot (S - 0,1)^{0,5} + 9$$

$$I_{gcor} = 14 \text{ (R4)} \quad T_m = 9,49 \cdot (S - 0,2)^{0,5} + 16$$

$$I_{gcor} = 7 \text{ (R3)} \quad T_m = 20 \cdot (S - 0,3)^{0,5} + 23$$

$$I_{gcor} = 3 \text{ (R2)} \quad T_m = 71 \cdot (S - 0,5)^{0,5} + 75$$

Pour T_b , on obtient :

$$I_{gcor} = 60 \quad T_b = 15,5 \cdot (S - 0,5)^{0,5} + 16$$

$$I_{gcor} = 25 \quad T_b = 28 \cdot (S - 0,1)^{0,45} + 30$$

$$I_{gcor} = 15 \quad T_b = 35,3 \cdot (S - 0,15)^{0,45} + 50$$

$$I_{gcor} = 10 \quad T_b = 58,85 \cdot (S - 0,2)^{0,45} + 80$$

$$I_{gcor} = 7 \quad T_b = 98,1 \cdot (S - 0,3)^{0,45} + 120$$

$$I_{gcor} = 3 \quad T_b = 215 \cdot (S - 0,5)^{0,45} + 300$$

Nous n'avons pas cherché à lisser les paramètres pour obtenir des variations régulières avec I_g . D'ailleurs il est possible que la révision systématique des caractéristiques de l'hydrogramme pour des superficies supérieures à 10 Km^2 conduise à des valeurs légèrement différentes de ces paramètres. Notons que la forte croissance des valeurs a et b avec la décroissance de la pente montre bien la forte influence de celle-ci.

Tableau II

SITUATION ET CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES BASSINS ETUDIES

Bassin	Pays	Coordonnées		Superficie Km ²	I _g m/Km	I _{gcor.} m/Km	Substratum	Sol	Indice P ₁
		Lat. & Long.	N						
Tikare I	Burkina Faso	13°17'	1°42'	0,11	75		Sc	E + Grav	P3 p4
Kountkouzout S. S.	Niger	14°50'	5°39'	0,27	(50)		Grs + Ca	E + Sp	P3
In Tiziouen II	Niger	17°09'	8°06'	0,67	21	60	Gra + Gn	E + A + Rg	P2
Ansouri	Burkina Faso	13°18'	1°45'	0,69	22		Sc	E + Ag	P3
Kountk. S. B.	Niger	14°50'	5°37'	0,71	18		Grs + Ca	E + SP + Grav	
Jalafanka S. S.	Burkina Faso	14°35'	0°30'	0,81	7		Gra	Agl	P2
Mogodé B.	Cameroun	10°35'	13°35'	0,94	35		Gra	S + Spp + V	P3
Niamey VI	Niger	13°33'	2°07'	1,0	7?		S + Grs	S + Rs	P4P3
Kolel	Burkina Faso	14°34'	0°28'	1,05	55	75	Ga	E	P3P4
Mogodé A	Cameroun	10°34'	13°35'	1,08			Gra	B + S + <u>V</u>	(P4P5)
Niamey BAO-T	Niger	13°31'	2°06'	1,54	8		S	S + <u>I</u>	P5
Sofoya V	Tchad	16°04'	20°56'	1,63	(15)		Gra + Gra	Rg + G1 + <u>E</u>	P2
In Tiziouen I	Niger	17°09'	5°37'	1,87	13	25	Gra + Gn	E + A + Rg	P2

Tableau II (suite)

SITUATION ET CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES BASSINS ETUDIES

Bassin	Pays	Coordonnées Lat. & Long.		Superficie Km ²	Ig m/Km	Igor. m/Km	Substratum	Sol	Indice P ₁
Tikare II S S	Burkina Faso	N 13°17'	W 1°42'	2,36	(40)		Sc	E + Grav	P3P4
Kaouara (reduit)	Niger	N 14°06'	E 5°41'	2,5	18		Cont T	M	P, P1
Diam Nadié	Senégal	N 14°44'	W 17°08'	2,6	11		Ca	Ag	P2P3
In Azena	Niger	N 17°09'	E 5°37'	2,6	14	27	Gra + Gn	E + A + Rg	P2
Pô	Mauritanie	N 15°47'	W 12°28'	2,7	8,5	10	Sc + <u>Grs</u>	Ag + <u>S</u>	P2
Bodéo	Burkina Faso	N 14°08'	W 10°38'	3,45	6,6		Sc	G1	P2
Bouloré	Cameroun	N 10°38'	E 14°18'	3,75	58		Rv	E + Ag	P3P2
Kereng	Cameroun	N 9°49'	E 14°00'	4	12	37	Sc	Ag	P3P2
Leleng	Cameroun	N 10°43'	E 14°13'	4	46		Gra	E + A + G1	P3
Tambougou	Burkina Faso	N (12°00')	W (1°40')	5,6	(10)				
Kourien Doulien	Tchad	N 17°09'	E 21°37'	7,8	16	73	Grs	E + Rs + S	P3P2
Sinkoroni	Mali	N 13°53'	W 4°13'	8,9	18		Grs	E + Rs + Spp	P3
Polaka	Burkina	N 14°35'	W 0°39'	9,14	8	15,5	Gra	E + S + G1 + A + Sp + Grav	P3
Tchalol	Burkina Faso	N 14°34'	W 0°37'	9,28	9,9	15	Sc + Gra	E + G1 + V + S	P2

Tableau II (suite)

SITUATION ET CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES BASSINS ETUDIES

Bassin	Pays	Coordonnées Lat. & Long.		Superficie Km ²	Ig m/Km	Igcor. m/Km	Substratum	Sol	Indice P ₁
Oued Ali	Mauritanie	N 17°48'	W 12°17'	10,4	15		Grs	E + S + Ag	P3P2
Taraiman	Tchad	N 14°34'	E 20°50'	11,2	3		Gra	Rg	P2
Abou Goulem	Tchad	N 13°35'	E 21°40'	12,3	13	22	Gra + Gn	E + A + S	P4
Outardes	Burkina	N 14°35'	W 0°32'	16,5	7,2		Ga	E + G1 + V + S	P2
Gountouré	Burkina	N 14°38'	W 0°24'	24,6	4,6	7,3	Gra	GL + Grav + V	P2P1

Tableau III

CARACTERISTIQUES DES CRUES DES PETITS BASSINS VERSANTS REPRESENTATIFS SAHELIENS

(Hydrogrammes instantanés)

Bassin	S Km ²	Ig corrigé (2)	Tm min	Tb min	Qmax/Qmoy	Kr10	Kr70 mm (1)	Kr100 mm (1)	Indices
Tikaré I	0.113	75	7-10	20-30	2.5-2.6	24	21.5	24	P3 (P4)
Kountkouzout SS	0.265	(50)	7-8	22-25	2.3-2.4	48.2	43.5	50	P3
In Tiziouen II	0.67	61	4-5	25-30	2.4 ?	70	74	(80)	P2
Ansouri	0.69	22	27	70	2.7	26	21	25	P3
Kountkouzout SB	0.71	17	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	24.5	27	P3
Niamey VI	1.0	7?	7-10	45-55	2.5	21	14	21	P4 P3
Kolel	1.05	75	12-13	55-60	3.3-3.4	23.5	21	25	P3 P4
Mogodé A	1.08		75			10-12	10	10-12	(P4 P5)
Niamey BAO Trésor	1.54	9	10	35		8.5	7	8.5	P5
Sofoya V	1.63	15?	13-14	60		(50)	52	(60)	P2
In Tiziouen I	1.87	25	15-18	45-55	2.4-2.5	64	70	(75)	P2
Tikaré II	2.36	(40)	20	70	2.5	18.5	14	18.5	P3 P4
Kaoura (réduit)	2.5	18	20	90-95	3	69	66	71	P2 P1
Diam Nadié	2.6	11	50	210	2.4	(46.5)	(40)	(42)	P2 P3
In Asena	2.61	27	10	75	2.4	57	63	68	P2
Pô	2.71	10	25-30	90-100	2.2-2.4	61	58	62.5	P2
Bodéo	3.45	6.6	65	185-190	2.05-2.10	56	53	59	P2
Boulouré	3.75	58	10	45-50	2.3	45	41	44.5	P3 P2
Kereng	4 (4)	37	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					

Tableau III (suite)

CARACTERISTIQUES DES CRUES DES PETITS BASSINS VERSANTS REPRESENTATIFS SAHELIENS

(Hydrogrammes instantanés)

Bassin	S Km ²	Ig corrigé (2)	Tm min	Tb min	Qmax/Qmoy	Kr10	Kr70 mm (1)	Kr100 mm (1)	Indices
Kourien - Doulien	7.8	73	35	110	(2)	(38)	(41.5)		P3 P2
Sinkoroni (3) DSP-FSP	8.9	18	DSP 20-30 FSP 50-55	120 140-160	2.8 2.6	16 26.4	14 25	17 27	P3 P3
Polaka	9.14	15.5	45.55	110-130	2.8	26	25	30	P3
Tchalol	9.28	15	45.55	145-150	2.1	50.5	49	58	P2
Oued Ali	10.4	15	25	130-140	2.4	36.5	35	40	P3 P2
Taraïman	11.2	3	270	840	2	48.5	47.5	50	P2
Abou Goulem	12.3	14	30	90-100	2.8	18	14.3	18.5	P4
Outardes	16.5	7.2	75	280-300	2.1	40.5	37.5	53	P2

- (1) 70 mm ponctuel 100 mm ponctuel
 (2) s'il y a lieu (pentes latérales)
 (3) DSP début de saison des pluies FSP fin de saison des pluies
 (4) 3 à 3.5 actifs