

# PREMIERS ESSAIS D'ÉTUDE GÉNÉRALE DU RUISSELLEMENT SUR LES BASSINS EXPÉRIMENTAUX ET REPRÉSENTATIFS D'AFRIQUE TROPICALE

J.A. RODIER

Ingénieur en Chef à Electricité de France (IGECO)  
Chef du Service Hydrologique de l'Office de la Recherche  
Scientifique et Technique Outre-Mer

et

C. AUVRAY

Directeur de Recherches à l'Office de la Recherche  
Scientifique et Technique Outre-Mer

A l'occasion d'une étude générale des crues sur les petits bassins versants de l'Afrique Noire à l'Ouest du Congo, les auteurs ont entrepris des recherches comparatives sur les éléments du ruissellement: diagramme de distribution et coefficient de ruissellement depuis 1953. L'étude a porté sur les crues provoquées par l'averse type de fréquence décennale qui, dans les diverses zones, reste assez voisine de 110 mm avec un schéma de variations des intensités sensiblement le même. La reconstitution des crues correspondant à ces averses est une opération fort peu différente de celle qui consisterait à soumettre les bassins de chacune des trois catégories suivantes à une averse identique et à vérifier le ruissellement qui en résulterait.

Les bassins ont été classés en effet en : subdésertiques et sahéliens, tropicaux et tropicaux de transition, forestiers; chacune de ces catégories correspond, en fait, à un type donné de couverture végétale. Chaque bassin présente un indice de perméabilité et un indice de pente. Les diagrammes de variations des coefficients de ruissellement en fonction de la superficie sont donnés pour les divers indices. Les temps de montée et la durée du ruissellement sont pratiquement indépendants de la perméabilité; ils sont donnés en fonction de la superficie et de la pente pour diverses catégories.

Ces données permettent de déterminer l'hydrogramme d'où on déduit les débits de crues décennales.

## SUMMARY

For the general study of the floods on small catchments areas in tropical Africa West of the Congo, the authors carried out comparative researches about constituents of the surface/runoff: distribution graph and runoff coefficient (ratio runoff/rainfall). This study used the results of sixty experimental and representative catchments covering from 2 up to 125 square kilometers, and managed by the Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, since 1953. Research are directed to the floods related to the ten years storm which, in the various areas, yields from 90 to 130 mm with about the same intensity pattern.

The estimation of the parameters of the hydrographs of these floods does not differ widely with testing the catchment of one of the third following categories by the same storm.

The catchments have been divided in three categories: subdesertic and sahelian, humid tropical, forest. Each of these categories is related to a type of vegetal cover. Each catchment has index of permeability and an index of slope. The diagrams showing the runoff coefficient as a function of the catchment area are presented for the different values of the indices. Rise time and runoff time are practically no depending upon the perviousness index. They are given as a function of area and slope index for the three categories.

These data permit determining of the hydrographs and therefore of the maximum discharge values for the ten years floods.

Le programme de recherches hydrologiques de l'ORSTOM est généralement orienté vers des applications pratiques. Parmi les questions que posait la réalisation des travaux d'infrastructure dont l'Afrique Tropicale avait le plus urgent besoin, la détermination des crues exceptionnelles des petits cours d'eau s'est vite imposée aux hydrologues comme une des tâches les plus importantes.

L'histoire des premiers petits ouvrages routiers et des barrages d'hydraulique agricole a bien mis en lumière les désastreuses conséquences d'aménagements réalisés sans études hydrologiques. Jusqu'en 1957, en effet, il y avait en Afrique Tropicale très peu de données sur les débits de crues des petits cours d'eau. Les nombreuses destructions de barrages et de ponts ont eu cette conséquence heureuse de faciliter la mise à disposition des hydrologues de crédits parfois suffisants, qui ont permis d'aménager de nombreux bassins représentatifs et expérimentaux. Certains de ces bassins ont été étudiés spécialement en vue de l'étude des fortes crues, d'autres avaient pour objet principal la détermination d'autres caractéristiques hydrologiques mais, sur tous les bassins aménagés par l'ORSTOM, on a fait en sorte que les aménagements et le programme de mesures permettent l'étude des fortes crues. En particulier, la disposition des stations de jaugeages était telle que la courbe d'étalonnage hauteurs-débits avait une forme simple jusqu'aux plus fortes crues et les hydrologues avaient pour consigne d'effectuer des jaugeages jusqu'au maximum des plus fortes crues. Par ailleurs, pour toutes études hydrologiques importantes : par exemple, celles relatives aux grands barrages hydro-électriques ou aux grands projets d'hydraulique agricole, on a aménagé des petits bassins représentatifs, ce qui ne donnait lieu qu'à une faible dépense supplémentaire. L'ORSTOM a équipé, en outre, des bassins représentatifs ou expérimentaux pour la recherche pure.

Les programmes d'observations et la méthodologie d'interprétation étaient les mêmes pour tous les bassins.

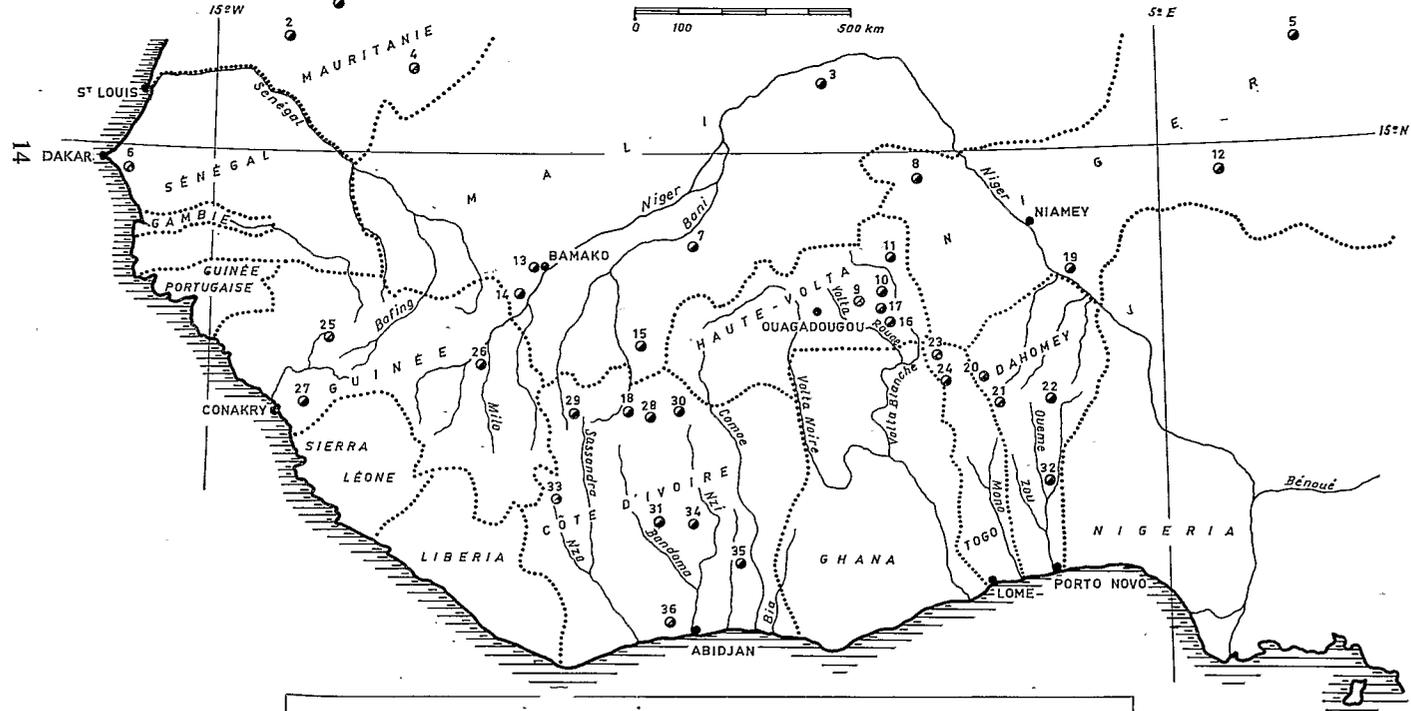
Pour l'Afrique Noire d'Expression Française, 90 bassins expérimentaux ou représentatifs ont été ainsi aménagés jusqu'à fin 1964, dont 80 par l'ORSTOM. Certains ont été suivis pendant trop peu de temps encore pour permettre une interprétation méthodique; pour d'autres, il n'a pas encore été possible de procéder au dépouillement; quelques bassins, par exemple les bassins urbains, présentent un caractère trop particulier pour des études générales. En définitive, 60 bassins peuvent fournir actuellement des données utilisables pour une étude d'ensemble du ruissellement.

Dès 1955, l'ORSTOM a pu dégager quelques données concernant plus particulièrement les zones à plus fort ruissellement. En 1960, on a pu fournir des débits de crues décennales pour toute une série de bassins correspondant aux cas les plus courants. A la fin de 1961, Claude AUVRAY présentait une première tentative d'estimation systématique des débits de crues sur petits bassins en faisant intervenir les principaux facteurs conditionnels; des études partielles avaient été effectuées dans le même esprit pour la COTE D'IVOIRE, le DAHOMEY et le CONGO.

Une synthèse générale est prévue actuellement pour l'interprétation des données de l'ensemble des bassins : elle s'étendra sur plusieurs années et exigera, sur le terrain, d'importants compléments concernant plus particulièrement la géomorphologie et la pédologie. Mais on a estimé possible d'effectuer en quelques mois une synthèse préliminaire conduisant à des données plus précises et plus sûres que celles de 1961. Les résultats définitifs destinés aux ingénieurs des Travaux Publics ou aux agronomes intéressent surtout les régions pour lesquelles ils ont été établis mais, par contre, les études de ruissellement effectuées pour arriver à ces chiffres sont d'une portée beaucoup plus générale et c'est pourquoi il a semblé intéressant de les présenter ici.

#### QUELQUES INDICATIONS SUR LES CONDITIONS NATURELLES

Les données brutes des bassins représentatifs utilisées pour la présente étude ne concernent, en général, que les moyennes et fortes crues et, par suite, que les moyennes



1_ OUED SELOUMBO	OUED MOKTAR OUED ALI	13_ DOUNFING	25_ KANDALA
2_ DIONABA		14_ DJITIKO	27_ MAYONKOURÉ
3_ TIN ADJAR	15_ FARAKO	16_ SELOGEN	28_ SOLOMOUGOU _ KORHOGO
4_ AFFOLÉ	17_ BOULBI	18_ BAGOE	29_ BAOULE (ODIENNE)
5_ IN TIZIOUEN	19_ KOULOU	20_ BOUKOMBE	30_ FERKESSEDOUGOU
6_ SEBIKOTANE	21_ TERO (DJOUGOU)	22_ TIAPALOU WENOU	31_ KAN (BOUAKÉ)
7_ KOUMBAKA	GORI BOUNIEROU	23_ NADJUUNDI	32_ LHOTO
8_ CAGARA	24_ NAPABOUR-KOUMFAB	24_ NAPABOUR-KOUMFAB	33_ NION _ GBOA _ LOUÉ
9_ ZAGTOULI	25_ TIMBIS	25_ TIMBIS	34_ IFOU
10_ MORO NABA			35_ BAFO _ SJTOU _ MANSO
11_ BOULSA			36_ AGBEBY
12_ HAMZA _ ALOKOTO			

Fig. 1 — AFRIQUE DEL'OUEST — Situation des bassins représentatifs et expérimentaux

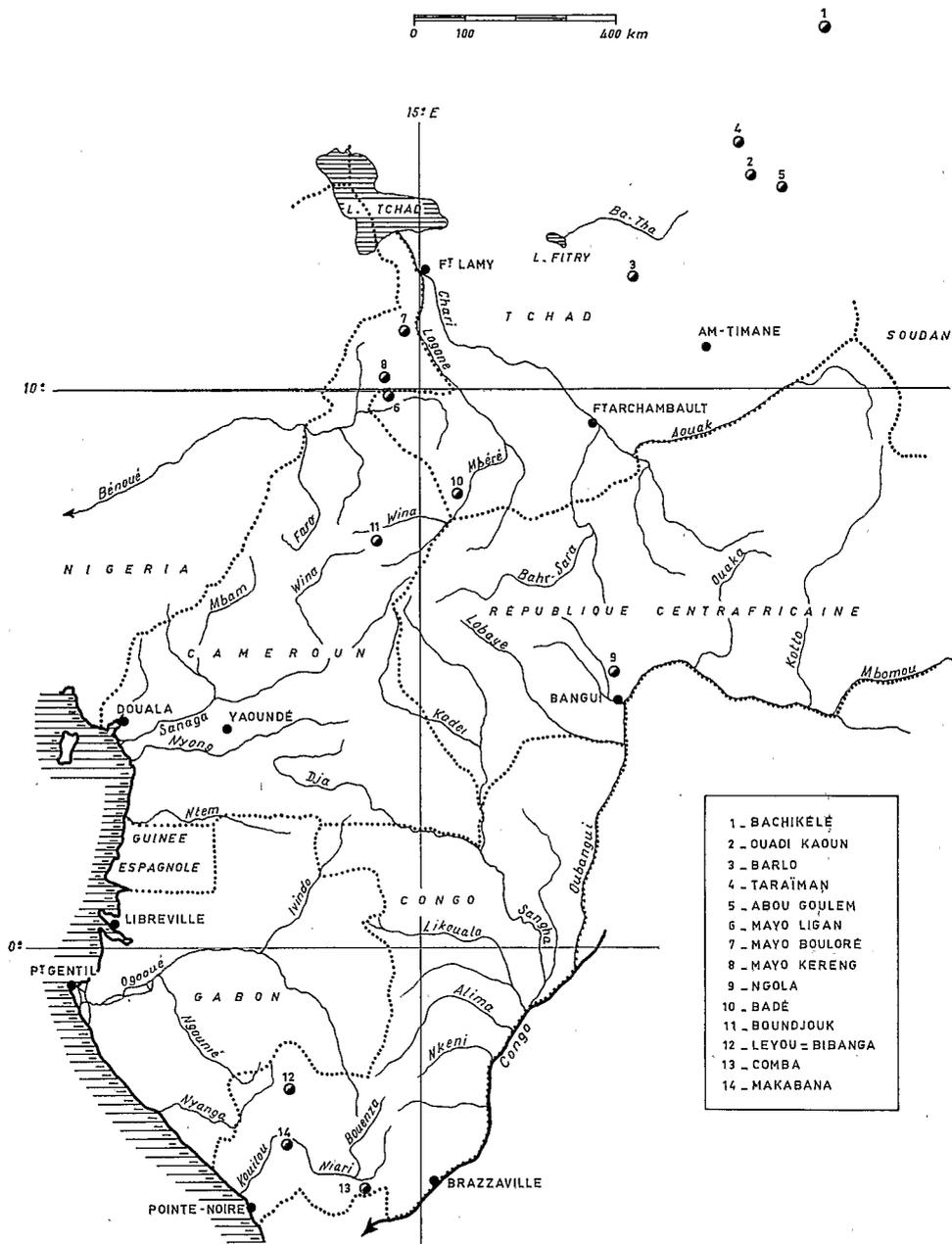


Fig. 2 — AFRIQUE CENTRALE — Situation des bassins représentatifs et expérimentaux

et fortes averses. Dans toute la région étudiée, qui s'étend du 6ème parallèle Sud au 18ème parallèle Nord et de la longitude 17° W à la longitude 27° E, le régime des pluies est commandé par l'ensemble de phénomènes qu'on désigne de façon assez impropre par le terme général de « mousson ».

Au Nord d'une ligne oblique, qui part de la latitude 8 à 9° en COTE D'IVOIRE pour arriver à la latitude 4° en République Centrafricaine, il y a une saison des pluies bien marquée, centrée sur le mois d'Août et dont la durée augmente du Nord au Sud de 1 mois 1/2 à 2 mois à la limite Sud du désert pour atteindre sept-huit mois au Sud. La saison des pluies étant de plus en plus longue, la hauteur annuelle de précipitations est, en général, de plus en plus grande du Nord au Sud dans l'hémisphère Nord. On relève la tendance inverse entre le 2<sup>me</sup> et le 6<sup>me</sup> parallèle Sud.

Au Sud de la ligne oblique définie plus haut, ce sont les régimes équatoriaux. On y distingue deux saisons des pluies : l'une centrée sur les mois de Novembre-Décembre, l'autre sur les mois d'Avril ou de Mai. La saison sèche d'été, très courte au Nord de la zone équatoriale, augmente du Nord au Sud pour atteindre 5 mois environ dans la région de BRAZZAVILLE.

Les fortes averses sont constituées au Nord et au Sud de la zone étudiée par des tornades, averses orageuses présentant un corps de courte durée et à forte intensité, suivi d'une traîne à faible intensité et précédé parfois d'une ondée préliminaire. Il peut arriver que l'averse soit double ou que le corps se dédouble mais, en général, à une certaine distance des côtes, l'averse est simple. On peut également considérer que, dans le cas le plus courant, il n'y a qu'une averse par 24 heures, de sorte que l'étude statistique des tornades se ramène à l'étude des averses journalières.

Chaque tornade couvre des superficies variables mais, le plus souvent, la zone intéressée par de fortes ou d'assez fortes précipitations est de l'ordre de 20 à 100 km<sup>2</sup>.

Au Nord de la limite septentrionale de la zone équatoriale, l'averse décennale peut être soit une tornade du même type que plus haut, soit une averse de caractère continu durant plusieurs heures avec des intensités maximales ne dépassant guère 50 à 60 mm/h.

Mais, généralement, c'est l'averse type tornade qui fournit le plus fort débit instantané (mais pas le plus fort volume). Au Sud du 2<sup>me</sup> parallèle Sud, les averses sont constituées par des tornades.

Si on exclut la moitié Sud de la COTE D'IVOIRE, l'extrême Sud du TOGO et du DAHOMEY, le Sud du CAMEROUN, le GABON et la moitié Nord du CONGO, la région intéressée est soumise au même type de forte averse, la tornade. Encore, convient-il de préciser que les zones exclues sont couvertes par la forêt pour laquelle la forme du hyétoGRAMME ne présente pas une très grande importance.

On doit exclure également une étroite bande côtière d'une trentaine de kilomètres de SAINT-LOUIS du SENEGAL à POINTE-NOIRE.

La hauteur de précipitations décennales a fait l'objet d'études systématiques pour la plus grande partie de l'Afrique Occidentale : plus à l'Est, des études régionales ont permis de trouver, pour des climats équivalents, des hauteurs très voisines.

La hauteur annuelle de précipitations est en rapport assez étroit avec le type de régime. On a reporté, sur le graphique ci-joint, les hauteurs de précipitations journalières décennales en fonction des hauteurs annuelles; on constate une certaine dispersion due à des singularités d'exposition : zones particulièrement exposées aux orages ou abritées au contraire. Mais un fait très important est la faible variation de la hauteur de précipitation décennale avec la hauteur annuelle. Nous reviendrons plus tard sur ce point.

Le sol présente des caractéristiques très variées; citons quelques types parmi les plus courants : sol hydromorphe argileux très imperméable, sol de piémont à proximité des roches cristallines, très imperméable, regs caillouteux imperméables lorsqu'ils ont

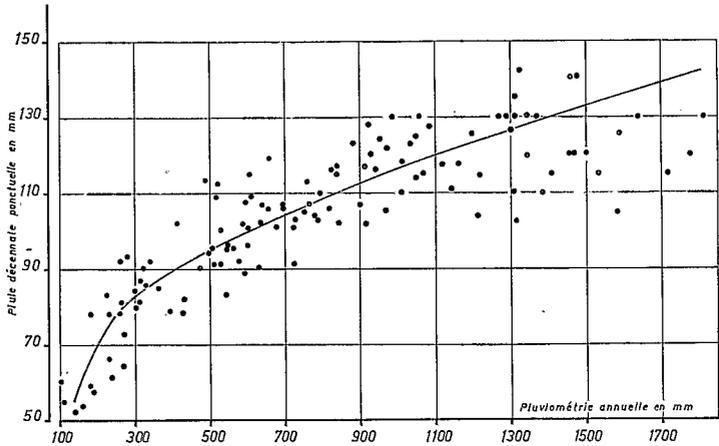


Fig. 3 — Précipitations décennales de 24 h en fonction de la hauteur des précipitations moyennes annuelles.

été imbibés, carapaces ferrugineuses plus ou moins démantelées perméables, arènes granitiques perméables, argiles de sols ferralitiques assez imperméables, sables de KELO ou des Plateaux BATEKES très perméables, etc ... Certains bassins expérimentaux correspondent à une association de deux ou trois sols différents, association typique pour la région environnante; de tels bassins présentent de réelles difficultés pour une interprétation systématique. De façon générale, on trouve plus rarement des sols vraiment imperméables en forêt ou au voisinage de la bande forestière tropicale (zone guinéenne).

Le relief est rarement très accentué, les vrais bassins de montagne sont très rares. La dénivellation entre la station et le point le plus élevé du bassin n'est jamais telle qu'il y ait changement de climat. Il n'y a pas de neige. L'influence de l'altitude est négligeable d'un point à l'autre du bassin. Mais on verra plus loin que celle de la pente est très importante.

Sans passer en revue tous les types de formation végétale, indiquons seulement les formes les plus courantes :

Au Nord de l'isohyète 750-800 mm, on rencontre la savane armée : association d'arbustes souvent épineux et de graminées qui couvrent mal le sol, prolongée vers le Nord par la pseudo-steppe saharienne qui ne le couvre pas du tout. Ces formations correspondent aux régimes hydrologiques subdésertiques et sahéliens.

Plus au Sud, on rencontre la savane et la savane boisée qui couvrent assez bien le sol et freinent sérieusement le ruissellement. Elles correspondent aux régimes tropicaux et tropicaux de transition et à certaines zones du régime équatorial de transition austral.

Plus au Sud, enfin, on rencontre la forêt qui freine beaucoup plus efficacement encore le ruissellement; elle ne couvre que des régions équatoriales.

#### CARACTÉRISTIQUES DES BASSINS REPRÉSENTATIFS ET EXPÉRIMENTAUX

Ils couvrent de petites surfaces variant de 0,5 à 200 km<sup>2</sup>. Il existe des bassins de superficie plus grande. On a même entrepris l'étude de bassins-types de « 1 000 km<sup>2</sup> » mais les recherches ne sont pas encore suffisamment avancées pour en permettre l'interprétation générale.

Pour faciliter l'échange des résultats, on a souvent été conduit à fixer des superficies standard. L'une d'elles est devenue courante : c'est la superficie de 25 km<sup>2</sup> à partir de laquelle il devient souvent indispensable de calculer le débit maximal devant passer sous un ouvrage routier; elle est couverte par une seule tornade. C'est le domaine d'élection, en Afrique Tropicale, de la méthode de l'hydrogramme unitaire et il est facile d'y trouver des averses unitaires, étant donné la durée du temps de parcours et la durée moyenne du corps de l'averse.

En fait, la superficie des bassins étudiés est rarement égale à 25 km<sup>2</sup> car le caractère particulier du réseau hydrographique, les conditions que doit remplir un site de station de jaugeage et le tracé du réseau de routes et de pistes conduisent souvent à une superficie différente comprise entre 15 et 50 km<sup>2</sup>. Mais après avoir déterminé les débits de crues spécifiques en l/s. km<sup>2</sup>, on les calcule pour une superficie de 25 km<sup>2</sup>. On sait en effet que, pour un bassin relativement homogène, les débits spécifiques décroissent avec la superficie.

On a également défini des surfaces-types de 100 km<sup>2</sup> et de 5 km<sup>2</sup>. Pour la première, la méthode des hydrogrammes unitaires s'applique assez mal avec les tornades africaines qui, à cette échelle, conduisent à des précipitations trop hétérogènes. Pour la seconde, elle s'appliquerait très bien mais les averses sont généralement de trop longue durée pour être unitaires.

L'équipement de ces bassins a été conçu plus particulièrement pour l'observation concomitante des précipitations et des débits. Pour un bassin de 25 km<sup>2</sup> par exemple, on installe une douzaine de pluviomètres ordinaires, deux pluviomètres enregistreurs dont l'un au centre du bassin. Cet ensemble, compte tenu du type d'averse étudiée et du faible relief, permet d'obtenir des données suffisantes sur la hauteur de précipitations moyenne pour une averse donnée, la répartition spatiale et temporelle.

L'équipement de la station est léger, souvent le lit est simplement stabilisé; une passerelle de jaugeage démontable ou, parfois, un petit transporteur, est installé dans la section ainsi qu'un limnigraphe et son échelle. Si les débits à mesurer sont peu élevés, la station est pourvue d'un déversoir ou d'un jaugeur Parshall mais, dans ce cas, ces dispositifs doivent permettre de jauger jusqu'aux plus fortes crues.

Généralement, une station secondaire de 5 à 10 km<sup>2</sup> est observée dans le bassin de 25 km<sup>2</sup>.

Enfin, une station climatologique permet de mesurer les divers éléments météorologiques en relation avec l'écoulement de surface. La capacité d'infiltration du sol a parfois été mesurée. Dans un seul cas, les nappes souterraines ont été observées en même temps que l'écoulement de surface. Mais il est bon de noter que, dans plus de la moitié des cas, la nature du sol est telle qu'il n'y a pas de nappe souterraine généralisée : seulement quelques petites réserves dans des zones d'altération et au voisinage des thalwegs principaux; en zones tropicale, sahélienne et subdésertique, le débit s'annule assez vite après les averses.

Quelques-uns de ces bassins ont donné lieu à une certaine expérimentation : étude avec couverture végétale, par exemple, puis défrichage et mise en culture, ou observation des résultats des mesures de conservation des sols. Ce sont alors de véritables bassins expérimentaux mais la technique de l'observation des précipitations et de l'écoulement superficiel reste la même.

Cet équipement léger et relativement peu coûteux en matériel fixe est de nature à favoriser la multiplication des bassins représentatifs de ce genre; tout le matériel mobile, même les tubes du limnigraphe et les éléments de la passerelle sont récupérés pour être implantés ailleurs.

Bien entendu, le bassin a fait, avant le début de l'installation si possible, l'objet d'une étude des sols et une carte sommaire pédologique a été établie.

Pendant toute la saison des pluies, l'ensemble des observations et mesures est effectué par une seule équipe sous la direction d'un hydrométriste confirmé. L'ingénieur

hydrologue prépare l'aménagement du bassin, participe à une partie de la campagne de mesures et fait d'assez fréquentes visites de contrôle.

Les études sur le terrain s'étendent sur trois saisons des pluies en général, quelquefois quatre lorsque trois saisons n'apportent pas assez d'éléments, quelquefois deux lorsque les averses sont très nombreuses et abondantes, par exemple, sous les isohyètes annuelles 2 000-3 000 mm. Certains bassins de recherche sont étudiés beaucoup plus longtemps.

#### PRINCIPE DU CALCUL DES CRUES ANNUELLES ET DÉCENNALES <sup>(1)</sup>

Si la crue ne dépendait que des précipitations, la crue décennale correspondrait exactement à l'averse de hauteur décennale. En fait, les phénomènes sont plus complexes.

Supposons qu'il n'y ait qu'un facteur secondaire : l'humidité du sol au début de l'averse. Une averse décennale pourra donner une crue de débit supérieur ou inférieur à la crue décennale suivant que l'humidité du sol sera anormalement forte ou anormalement faible. Inversement, une averse de hauteur inférieure à l'averse décennale pourra donner une crue décennale si le sol est particulièrement humide.

Pour simplifier, nous avons, dans nos calculs, admis que la crue décennale (ou annuelle) était provoquée par une averse de hauteur décennale (ou annuelle) présentant des caractéristiques de répartition spatiale et temporelle correspondant à des situations médianes pour les fortes averses et rencontrant des conditions d'humidité du sol et de couverture végétale correspondant également à des situations médianes. L'opération est d'autant plus hasardeuse que les facteurs autres que la hauteur des précipitations, surtout l'humidité du sol, jouent un rôle plus important.

Heureusement, dans cette partie de l'Afrique, ceci ne se produit pas dans les zones présentant le plus fort ruissellement où de graves erreurs sur les crues seraient particulièrement dangereuses. Il est heureux également que, généralement, dans le cas de tornade, le hyétogramme présente des formes semblables d'une averse à l'autre et que, pour 25 km<sup>2</sup>, l'averse couvre assez bien le bassin, ce qui réduit l'importance des deux facteurs : répartition spatiale et temporelle des précipitations.

Le calcul de la crue décennale a utilisé, dans presque tous les cas, la méthode des hydrogrammes unitaires. Il exige la connaissance du coefficient de ruissellement  $K_r$ , rapport du volume de précipitations ou volume de ruissellement et du diagramme de distribution ou hydrogramme type pour une averse unitaire. Dans certains cas, en particulier pour des terrains perméables, on a utilisé diverses variantes de la méthode de la capacité d'infiltration : on retranche l'infiltration en mm/h de l'intensité de l'averse en mm/h sur le diagramme de l'averse et on en déduit le volume de ruissellement. Cette méthode plus rationnelle mais beaucoup plus difficile a été assez peu utilisée, mais on y reviendra peut-être. Elle rend, pour le moment, de grands services dans des cas particuliers.

Mais dans la plupart des cas on utilise le coefficient de ruissellement. Celui-ci a été déterminé en fonction de la hauteur de précipitations et de l'indice d'humidité, généralement par l'étude des régressions multiples en fonction de ces facteurs ou, parfois, d'autres facteurs secondaires. Les premiers bassins expérimentaux ont été étudiés de façon beaucoup plus sommaire mais en prenant en considération les mêmes facteurs secondaires.

Depuis 1955, on a calculé ainsi les débits de crues décennales pour les 80 bassins cités plus haut, que le but principal de leur aménagement ait été ou non l'étude du ruissellement. Ces calculs ont été faits par la même équipe mais leur valeur est inégale. Cependant, les bassins de même type de sol, de même pente et de même climat ont toujours

<sup>(1)</sup> Nous rappelons que la crue annuelle est la valeur médiane de la distribution constituée par l'ensemble des valeurs maximales annuelles.

donné des résultats très voisins. Il est bon d'ajouter que, de 1952 à 1964, sur un ensemble de 90 bassins, il était normal d'observer effectivement un certain nombre de crues de fréquence égale ou inférieure à la fréquence décennale et c'est bien ce qui s'est produit. Pour un certain nombre de cas, les estimations des divers paramètres ont donc été faites par interpolation et non extrapolation, ce qui donne une certaine sécurité aux résultats de cette étude d'ensemble.

Indépendamment de l'utilité pratique des données ainsi estimées pour les crues décennales, les résultats obtenus peuvent présenter un intérêt plus général, c'est pourquoi nous avons estimé utile de présenter les données relatives au coefficient de ruissellement et au diagramme de distribution telles qu'elles ont été calculées pour les crues décennales, c'est-à-dire pour les averses décennales. Comme on le verra plus loin, pour une même grande catégorie de bassins, l'averse décennale varie assez peu de sorte que tout se passe comme si on avait soumis ces bassins à un même test de ruissellement et qu'on observe les différences de réactions de ces bassins suivant leur type de sol, leurs caractéristiques géomorphologiques et la couverture végétale; on met ainsi en évidence une partie importante du mécanisme du ruissellement.

#### CLASSIFICATION DES BASSINS SUIVANT LES FACTEURS CONDITIONNELS DE L'ÉCOULEMENT

Coefficient de ruissellement et diagramme de distribution varient d'un bassin à l'autre d'une même région climatique suivant divers facteurs dont les plus importants sont : la nature du sol, les caractéristiques géomorphologiques du bassin et la couverture végétale. L'idéal serait de définir, pour un bassin donné, chacun de ces facteurs par un seul index chiffré. Au stade de notre étude, c'est impossible. Nous nous sommes donc contentés de définir un certain nombre de classes de perméabilité du sol, de pente et de couverture végétale et de classer les bassins dans ces diverses catégories.

La perméabilité du sol d'un bassin est la caractéristique la plus importante d'un sol vis-à-vis du ruissellement ; elle est difficile à chiffrer pour les raisons suivantes : les bassins naturels sont presque toujours plus ou moins hétérogènes. Si un petit bassin est homogène, il risque de ne pas être représentatif. Ce qui compte, en outre, ce n'est pas la perméabilité mesurée au laboratoire sur un échantillon plus ou moins remanié, c'est la perméabilité en place dans les conditions du début de l'averse. La méthode la plus simple pour classer les perméabilités a consisté à utiliser les courbes qui, pour un bassin, définissent l'apparition de l'écoulement en fonction de la hauteur de précipitations et de l'indice d'humidité. On a pris, pour celui-ci, une forme extrêmement simple : l'écart de temps en jours à la pluie précédente, supérieure à une limite donnée, 5 mm par exemple.

On trouvera, ci-contre, un ensemble de courbes correspondant à quelques bassins. Plus la courbe est basse, plus le bassin est imperméable. On peut même définir la perméabilité par la position de la courbe; par exemple, la précipitation limite d'écoulement après 3 jours sans pluie. Notons que cette classification englobe à la fois la perméabilité et l'absorption par la couverture végétale, ce qui est sans grave inconvénient pour l'étude du ruissellement. Il serait préférable de remplacer le terme « perméabilité » par celui de « capacité globale d'absorption du bassin ».

On a défini ainsi 5 catégories :

- $P_1$  : Bassins rigoureusement imperméables : bassins entièrement rocheux ou argileux;
- $P_2$  : Bassins imperméables avec quelques zones perméables de faible étendue ou bassins homogènes presque imperméables;
- $P_3$  : Bassins assez imperméables comportant des zones perméables d'étendue notable ou bassins homogènes assez perméables;
- $P_4$  : Bassins assez perméables tels qu'on en rencontre en zone de décomposition granitique avec abondance d'arènes;
- $P_5$  : Bassin perméable : sables ou carapace latéritique très fissurée.

A l'intérieur d'une même catégorie, le sol peut être plus ou moins perméable. Dans le même ordre d'idée, il est assez difficile de ranger certains bassins dans une catégorie déterminée. Il en résultera une certaine dispersion dans nos résultats. On trouvera des points particulièrement aberrants avec des bassins très hétérogènes, par exemple avec les parties basses argileuses imperméables et les parties hautes de carapace latéritique fissurée.

Comme il n'a pas encore été possible de définir un indice unique géomorphologique utile pour le ruissellement, on a classé les bassins à la fois par leurs pentes transversales et leurs pentes longitudinales, en 6 catégories caractérisées par un indice  $R$  :

- $R_1$  : correspond à des pentes extrêmement faibles, inférieures à 0,1 et 0,2% ;
- $R_2$  : à des pentes faibles, inférieures à 0,5% : ce sont les bassins de plaine ;
- $R_3$  : à des pentes modérées comprises entre 0,5 et 1% : ce sont des terrains intermédiaires entre la plaine et les zones à ondulations de terrain ;
- $R_4$  : à des pentes assez fortes : pentes longitudinales comprises entre 1 et 2%, pentes transversales supérieures à 2%. Zones des ondulations de terrain ;
- $R_5$  : à des pentes fortes : pentes longitudinales comprises entre 2 et 5%, pentes transversales entre 8 et 20%. Régions de collines ;
- $R_6$  : à des pentes très fortes : pentes longitudinales supérieures à 5%, pentes transversales supérieures à 20%. Régions de montagnes.

Bien entendu, on suppose le bassin modérément ramassé et le réseau hydrographique correspondant à un cas moyen. Les bassins très allongés donneront lieu à des ruissellements anormalement faibles par exemple.

Les catégories de couvertures végétales ont été sensiblement confondues avec celles des climats.

Ceux-ci varient largement puisque nos bassins ont été implantés depuis la bordure Sud du SAHARA jusqu'au cœur de la forêt équatoriale ; il a été nécessaire de répartir les bassins en quelques grandes catégories correspondant aux grandes classes de régimes hydrologiques :

- les bassins sahéliens et subdésertiques,
- les bassins tropicaux et tropicaux de transition,
- les bassins équatoriaux de forêt.

Par bonheur, ces catégories correspondent à un type bien déterminé de couverture végétale, comme ceci a été vu plus haut, de sorte qu'à l'intérieur de chaque catégorie, on peut dire que le type de couverture végétale représente des propriétés assez voisines vis-à-vis du ruissellement. Notons, cependant, qu'au Sud de la zone sahélienne et dans la zone tropicale, la couverture végétale freine peu le ruissellement au début de la saison des pluies et le freine beaucoup à la fin. On aura donc intérêt, pour la catégorie I, à considérer le coefficient d'écoulement, par exemple, pour la première moitié de la saison des pluies (D.S.P.) en ce qui concerne les bassins sahéliens méridionaux et, pour la catégorie II, à considérer les données de la fin de la saison des pluies (F.S.P.).

Pour les bassins subdésertiques, la hauteur de l'averse décennale varie entre 60 et 85 mm.

Pour les bassins sahéliens, entre 85 et 110 mm.

Pour les bassins tropicaux et tropicaux de transition ainsi que les bassins équatoriaux de savane, entre 110 et 130 mm.

Pour les bassins de forêt entre 120 et 150 mm.

Si l'on met à part les bassins subdésertiques et si on tient compte du fait que la plupart des bassins sahéliens étudiés présentent une hauteur de précipitations annuelle supérieure à 450 mm (précipitation décennale 92 mm), on vérifie qu'en pratique les hauteurs de précipitations décennales varient dans des limites étroites.

Il aurait été plus intéressant pour notre étude de définir une averse standard de 100

ou 110 mm et de faire l'étude pour ce type d'averse. Nous ne l'avons pas fait pour deux raisons :

1<sup>o</sup> Il fallait refaire les calculs pour plus de 90% des bassins;

2<sup>o</sup> Il est peut-être prématuré de définir une averse standard donnée, on aurait risqué de faire tous les calculs pour 110 mm et d'avoir à les refaire deux ans après pour 100 mm. Ce n'est pas un travail énorme mais nos hydrologues sont accablés à la fois par un bon nombre de tâches urgentes et nous évitons au maximum tout travail inutile.

Comme nous l'avons vu plus haut, il n'est pas nécessaire, en pratique, de tenir compte de l'altitude.

#### RÉSULTATS OBTENUS DANS L'ÉTUDE DU COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT

Pour une averse de hauteur donnée, ce facteur varie avec la perméabilité du sol, la pente, la couverture végétale et la nature du réseau hydrographique. Pour une région homogène, il devrait varier peu avec la superficie du bassin versant; cependant, en Afrique Tropicale, il décroît plus ou moins quand la superficie augmente. Ceci tient à la répartition spatiale des averses et aux pertes dans le lit. Il croît avec la hauteur et l'intensité de l'averse avec une limite supérieure de 85 à 90%.

Dans certaines de nos études, nous avons utilisé un coefficient  $K_{ru}$  égal au rapport du volume du ruissellement au volume de précipitation utile, c'est à-dire au volume correspondant seulement à la partie assez intense des précipitations, les traînes à faible intensité étant éliminées. Mais ceci ne concerne qu'un petit nombre de cas et, pour l'homogénéité des résultats, nous n'avons considéré ici que le coefficient  $K_r$ ; le volume des précipitations intéressées correspond à la totalité du volume de l'averse responsable de la crue.

Les variations du coefficient d'écoulement ont été étudiées dans les trois cas suivants:

##### a) Régimes sahéliens et subdésertiques

On a considéré trois variables : la superficie du bassin versant, la pente et la perméabilité. Ces deux dernières variables n'ont pas pu être caractérisées par des chiffres comme nous l'avons vu plus haut; on s'est simplement contenté de répartir les bassins en différentes classes. Cela suffit au stade actuel de nos études.

On a porté les coefficients de ruissellements en ordonnées. les superficies en abscisses logarithmiques sur les divers graphiques. Le choix de ce genre de coordonnées a été simplement dicté par le souci de ne pas trop resserrer les points représentatifs pour les très petits bassins car, en fait, il conduit à des courbes de variations moins simples qu'on ne les aurait obtenues en coordonnées cartésiennes.

La perméabilité étant le facteur le plus important, on a établi des séries de graphiques, chacun correspondant non pas à une perméabilité mais à un couple de perméabilités, car il n'est pas toujours certain que tous les bassins aient bien été rangés dans la classe qui leur est propre.

La figure a été établie pour  $P_1$  et  $P_2$  : sols imperméables; étant donné la dispersion, nous n'avons pas cherché à tracer toutes les courbes correspondant aux diverses combinaisons  $R$  et  $P$ . Nous avons seulement cherché un tracé approximatif des courbes correspondant aux positions extrêmes rencontrées dans la pratique :  $R_4 P_1$  qui correspond aux plus forts coefficients de cette catégorie et  $R_2 P_2$  qui correspond aux plus faibles valeurs observées. On a tracé également la courbe  $R_4 P_2$  correspondant à des bassins que l'on rencontre souvent.

Les courbes  $R_4 P_1$  et  $R_4 P_2$  partent des limites supérieures du coefficient de ruissellement : 85 à 90%. Elles présentent une décroissance sérieuse de 10 à 40 km<sup>2</sup> : c'est là qu'apparaît la dégradation du réseau hydrographique, bien connue dans le régime sahélien, qui entraîne d'énormes pertes par évaporation; pour des bassins un peu plus grands, une partie de la superficie échappe à l'averse. Mais vers 100 km<sup>2</sup>, le coefficient

de ruissellement reste encore élevé. On doit noter la faible inclinaison de la courbe  $R_2 P_2$ . Aucun bassin ne donne de résultats pour la pente  $R_1$ , mais on sait qu'à parti<sup>r</sup> de 2 ou 3 km<sup>2</sup>, l'écoulement est pratiquement nul, l'eau stagne dans des marécages. Mais, dans ce cas, qu'il y ait le moindre axe de drainage de pente  $P_2$  et le coefficient de ruissellement est très important, comme ceci a été démontré avec les pentes un peu plus fortes, sur le bassin de CAGARA-Est, par exemple. Une part très importante des points représentatifs s'écarte nettement des courbes mais on en connaît parfaitement les raisons et, dans certains cas, on peut même calculer un coefficient corrigé. Citons les cas suivants :

- 1<sup>0</sup> Les bassins subdésertiques les moins arrosés (IN TIZIOUEN, BACHIKÉLE) présentent des crues décennales correspondant seulement à 50 mm environ, alors que tous les autres bassins reçoivent au moins 85 mm, d'où des coefficients de ruisselllements trop faibles.
- 2<sup>0</sup> Certains bassins, vers l'isohyète 800, au contraire, sont à la limite du régime tropical et du régime sahélien : c'est le cas du BARLO, du MORO NABA, de NADJOUNDI, du Mayo LIGAN, par exemple : ils peuvent fournir d'utiles indications mais on devra les utiliser avec précaution; en terrain  $P_2$ , par exemple, les résultats bruts seront un peu trop élevés pour les grands bassins (BOULSA, Mayo LIGAN), trop faibles pour les très petits.
- 3<sup>0</sup> Les trois bassins de HAMZA, ALOKOTO et KOUMBAKA I sont très hétérogènes. Ils présentent tous des carapaces latéritiques plus ou moins démantelées correspondant à  $P_4$ ; le reste de la superficie est du type  $P_2$  ou  $P_1$ . En fait, seule une partie du bassin ruisselle de façon intense; si tout le bassin était en  $P_2$ , il faudrait multiplier les coefficients de ruissellement par 2 ou 3 pour HAMZA et majorer très sérieusement pour ALOKOTO et KOUMBAKA I.
- 4<sup>0</sup> Les évaluations pour TIN ADJAR réduit et CAGARA-Est sont peu précises, les limites des bassins étant difficiles à définir.
- 5<sup>0</sup> Le bassin de TARAMAN est constitué par un reg à classer en  $P_3$  au début de la saison des pluies et plutôt en  $P_2$  à la fin, d'où le point d'interrogation.

Notons que ces courbes seraient moins incertaines si nos indices  $R$  et  $P$  pouvaient serrer la réalité de plus près et si également, dans un souci de sécurité, certains de nos hydrologues n'avaient pas légèrement surestimé certains coefficients de ruissellement, surtout pour ces bassins imperméables qui les ont effrayés à juste titre. Mais, parmi les points figuratifs représentés, nous rappelons que certains correspondent à des crues décennales effectivement observées (cas de KOUMBAKA II par exemple) et d'autres à faibles extrapolations.

La figure 5 correspond à la perméabilité  $P_3$  : la dispersion reste forte mais les courbes sont nettement en dessous de celles de la figure 3. On ne retrouve plus, bien entendu, les très forts coefficients de ruissellement des perméabilités  $P_1$  et  $P_2$  en dessous de 20 km<sup>2</sup>. Ceci est bien mis en évidence par les deux bassins de SELOUMBO. Ces deux bassins sont également intéressants à un autre titre : l'un d'eux est manifestement plus perméable que l'autre, la proportion de grès fracturés y étant plus forte et, cependant, on ne peut faire autrement que de les classer tous deux en  $P_3$ . On voit ici la précision que l'on gagnerait à une classification plus fine des perméabilités. Les deux points de SELOUMBO demanderaient à être décalés légèrement vers le haut. En effet, ils correspondent au régime subdésertique et reçoivent une averse décennale de 82 mm seulement, un peu inférieure à la limite inférieure de celle du régime sahélien. Le point figuratif du TARAMAN est, cette fois-ci, aberrant dans l'autre sens : en pleine saison des pluies, sa perméabilité se rapproche plutôt de  $P_2$ .

Pour l'Ouadi KAOUN (bassin réduit), la superficie ne peut pas être définie avec précision, le calcul du coefficient de ruissellement a été très sommaire.

La courbe  $R_2 P_3$  est donnée à titre purement indicatif. Il n'y a pratiquement pas de bassin pour le tracer.

La figure 6 correspond aux terrains perméables  $P_4$ . Seuls ruissellent pratiquement pour les fortes averses les bassins à assez forte et à forte pente. Deux bassins à très forte perméabilité  $P_5$  sont représentés : ceux du FARAKO et du DOUNFING. En fait, ce sont des bassins tropicaux recevant respectivement des averses décennales de 110 et 130 mm. En climat sahélien, ils présenteraient des coefficients de ruissellement nettement plus faibles. La courbe  $R_4 P_5$  aurait probablement la position de la courbe  $R_3 P_4$  ou serait même encore en dessous. Il est notoire que les terrains de perméabilité  $P_5$  en zone sahélienne ne donnent pas de ruissellement organisé pour des superficies supérieures à quelques  $\text{km}^2$ .

Même pour la perméabilité  $P_4$ , on peut dire qu'il n'y a guère de ruissellement, même en forte crue, pour des pentes inférieures à celles des bassins  $R_3$ .

#### b) Régimes tropicaux et tropicaux de transition

Nous reprendrons dans cette catégorie les bassins situés à la limite du régime tropical et du régime sahélien (entre les courbes isohyètes 800 mm et 1 000 mm). Nous comprendrons de même, dans cette catégorie, les bassins équatoriaux de savane qui présentent les mêmes types d'averses décennales, le même sol, la même végétation que les bassins tropicaux de transition.

Pour l'ensemble de ces bassins, la végétation joue un certain rôle. En fait, l'indice de perméabilité  $P$  tient compte à la fois des pertes par infiltration dans un sol perméable et de l'eau absorbée par la couverture végétale.

Un autre point caractéristique, pour les bassins tropicaux, est la différence de comportement du bassin entre le début et la fin de la saison des pluies. On considérera généralement sur nos graphiques le coefficient de ruissellement de la fin de la saison des pluies, c'est le plus élevé. Par contre, les temps de concentrations sont plus longs.

On trouve peu de bassins de perméabilité  $P_2$  et, encore, celle-ci est observée entre les isohyètes annuelles 800 et 1 000 mm à la limite du régime sahélien. Ceci est dû à la couverture végétale plus dense et aussi au fait que les sols très imperméables sont moins fréquents dans ces zones mieux arrosées et mieux protégées par la végétation.

La figure 7 correspond à la perméabilité  $P_2$ . Il n'y a pas de bassins  $P_2$  de superficie inférieure à 2  $\text{km}^2$  mais les indications des Mayos KERENG et BOULORE dont la perméabilité est proche de  $P_2$ , quoique un peu plus forte, montrent que la courbe passe peu au-dessus de ces points représentatifs. Pour autant que le faible nombre de points représentatifs permette de l'affirmer, le coefficient de ruissellement serait plus faible, pour les très petits bassins, qu'en régime sahélien. Il serait à peu près le même pour les bassins de 100  $\text{km}^2$ .

Il est déjà assez osé de tracer la courbe  $R_4 P_2$ , il le serait davantage de tracer les courbes  $R_3$  et  $R_2$ . On a reporté sur ce graphique les points figuratifs de NADJOUNDI au début et à la fin de la saison des pluies pour bien montrer la différence entre les deux situations.

La figure 8 correspond à la perméabilité  $P_3$ . On y a utilisé les bassins de la limite Nord du régime tropical qui ont déjà été employés avec prudence pour les régimes sahéliens.

La courbe  $R_4 P_3$  est assez bien connue. Le coefficient de ruissellement ne varie plus que très peu avec la superficie. Mais cette courbe correspond surtout à des bassins recevant, par an, entre 800 et 1 200 mm; elle serait la même pour des bassins recevant de 1 200 à 1 600 mm; peut-être, la couverture végétale plus dense conduirait-elle à des valeurs plus faibles comme tendent à l'indiquer les cas de BOUNDJOUK et de MAKABANA, en dehors de la zone limite entre sahélien et tropical.

La figure 9 correspond aux perméabilités  $P_4$  et  $P_5$ . Elle montre, avec une honorable dispersion (notons que la distinction entre  $P_4$  et  $P_5$  n'est pas toujours facile), que le coefficient de ruissellement tend à devenir indépendant de la superficie du bassin, ce qui est normal puisque le réseau hydrographique bien organisé ne donne pas lieu

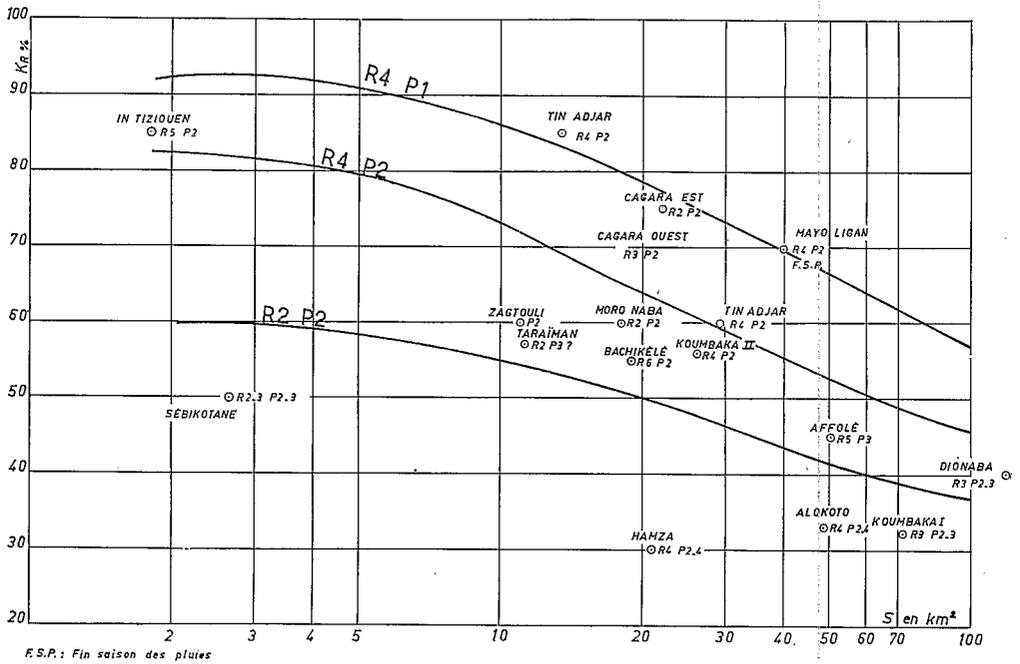


Fig. 4 — COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT — Régimes sahéliens et subdésertiques Perméabilité P1-P2

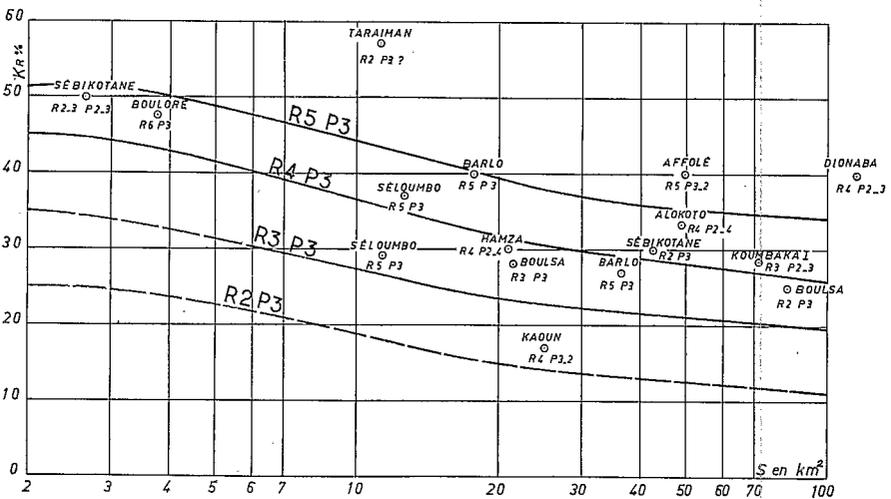


Fig. 5 — COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT — Régimes sahéliens et subdésertiques Perméabilité P3

à de fortes pertes et que les hydrogrammes, plus mous qu'en régime sahélien, ne se déforment pas très rapidement de l'amont à l'aval.

On a manqué d'éléments pour représenter les courbes correspondant aux diverses valeurs de  $R$ .

Notons que, pour  $P_5$ , il semble que l'influence du relief soit assez faible pour  $P$  supérieur à  $P_2$  mais, en dessous, l'exemple des bassins de BADE montre que le coefficient de ruissellement tombe à des valeurs très faibles. Un facteur de dispersion non négligeable est constitué par le freinage des galeries forestières. Le point figuratif de TIAPALOU est très bas par suite d'une galerie assez épaisse qui est peu marquée sur les bassins voisins du WENOU et du GORI BOUNIEROU.

### c) Régions forestières

Incontestablement, les données expérimentales sont insuffisantes pour dégager les variations du coefficient de ruissellement en fonction des divers paramètres. Onze bassins, c'est trop peu, même pour des esquisses de graphiques comme celles que nous venons de présenter. Nous donnons d'ailleurs ci-après le tableau des données relatives aux crues décennales de ces bassins.

Ce que nous appelons « ruissellement », en zone forestière, est d'ailleurs une forme d'écoulement qui n'est plus celle du régime sahélien; elle serait plutôt comparable à l'écoulement hypodermique.

*Crues décennales sur petits bassins forestiers*

Bassin	Précipit. annuelle (mm)	Superficie (km <sup>2</sup> )	Crue décennale (1/s.km <sup>2</sup> )	Coefficient de ruisselt (%)	Débit de base $Q_0$ (m <sup>3</sup> /s)
NION	1 800	10	2 000 - 2 200	28	2,4
$R_6 P_6$	1 800	62	600 - 700	42	6
GBOA	2 300	11,5	2 500	50	0,75
$R_6 P_6$					
LOUE	2 300	17	2 500 - 2 800	32	1
$R_6 P_6$					
IFOU	1 200	38	350	10	1,25
$R_3 P_5$					
BAFO	1 600	27	1 800	65	2
$R_2 P_4$					
SITOU	1 600	29	2 000	70	2
$R_2 P_4$					
MANSO	1 600	92	1 600	60	4
$R_2 P_3$					
AGBEY	2 200	11	550	6	1
$R_4 P_6$					
LEYOU	1 800-				
$R_5 P_4$	2 000	6	1 00 - 1 100	11	0,35
BIBANGA	1 800	25,2	200 à 300	12	0,65
$R_2 P_4$	2 000				

D'autre part, l'influence de la couverture végétale masque trop la perméabilité du sol. Ainsi, les trois bassins du BAFO, du SITOU et du MANSO sont classés en  $P_3$  et en  $P_4$ , alors que l'étude des sols montre qu'ils devraient être classés en  $P_3$  et en  $P_2$ . La forêt

freine l'écoulement certes et ceci est bien visible dans l'étude des temps de montée, mais le climat humide limite les pertes par évaporation et les averses décennales (160 mm) sont beaucoup plus fortes que dans les cas précédents.

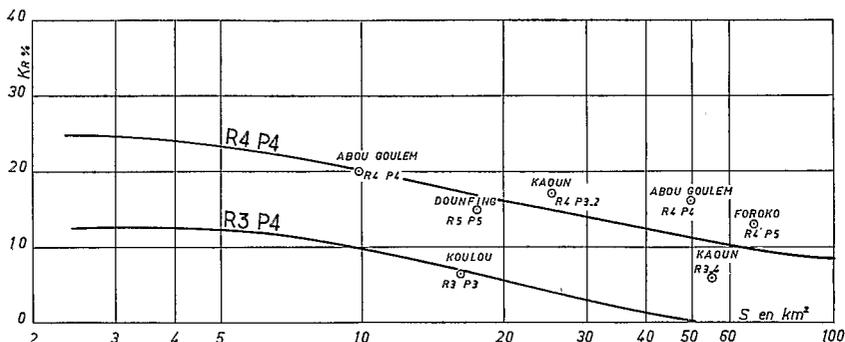


Fig. 6 — COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT — Régimes sahéliens et subdésertiques Perméabilité P4

Si la pente est extrêmement forte ( $R_6$ ), on peut encore trouver sur sol perméable des coefficients de ruissellement de 35 à 50% comme sur le NION, le GBOA, le LOUE en COTE D'IVOIRE (on a trouvé des bassins du même genre dans les Monts de CRISTAL). Mais, dans ce cas, on doit noter que les averses sont supérieures à 200 mm.

Pour des pentes beaucoup plus modérées (BAFO, SITOU et MANSO), mais sur sols imperméables, on trouve des coefficients de ruissellement de 60 à 70% pour des bassins de 27 à 92  $km^2$ .

Il ne semble pas cependant que, pour de telles précipitations, les coefficients de ruissellement puissent atteindre en forêts les valeurs de 80% que l'on a trouvées en zone sahélienne.

Ces cas extrêmes étant mis à part, si le sol n'est pas trop imperméable et la pente inférieure à  $R_5$ , les coefficients de ruissellement varient entre 5 et 15% : la première valeur correspondant à des pentes modérées et des sols très perméables ( $P_6$  s'il n'y avait pas de forêt); la seconde, à une pente  $R_5$  et à un sol à classer dans  $P_3$  s'il n'y avait pas de forêt. Ce sont là des valeurs vraiment faibles si on considère que les averses décennales sont au moins égales à 130 mm.

Mais on restera très méfiant pour les sols imperméables ( $P_2$  s'il n'y avait pas de forêt) et les très fortes pentes genre  $R_6$ . D'ailleurs, dans les pays tropicaux à cyclones, on a mesuré des coefficients de ruissellement dépassant 80% pour les bassins à relief  $R_6$ . Un simple examen du réseau hydrographique indique d'ailleurs si on est en présence d'un bassin dangereux ou non.

L'ensemble de ces données sur le coefficient de ruissellement semble bien confus et il peut paraître hardi de présenter des courbes de variations précises dans de telles conditions, mais nous avons voulu indiquer par ces courbes les tendances de ces variations.

#### TEMPS DE RUISSELLEMENT ET TEMPS DE MONTÉE

La détermination de ces éléments de l'hydrogramme unitaire devrait être plus précise que celle du coefficient de ruissellement car elle ne résulte pas d'extrapolation. Cependant, on rencontre un certain nombre de difficultés :

Tout d'abord, la méthode de l'hydrogramme unitaire n'est qu'une méthode approchée, elle s'applique bien aux bassins homogènes, ce qui n'est pas souvent le cas. Par

ailleurs, il est fréquent qu'un même bassin présente plusieurs diagrammes de distribution : par exemple, un pour les faibles crues, l'autre pour les très fortes crues, ce qui est normal : dans le premier cas, l'écoulement correspond à un film d'eau assez mince sur le sol, dans l'autre cas, l'écoulement se produit en nappe et suit les lois normales de l'hydraulique, donnant lieu à des vitesses très différentes.

Les bassins sahéliens, les plus arrosés, et les bassins tropicaux, les moins arrosés, présentent également deux types de ruissellement : celui du début de la saison des pluies (DSP) avec sol très peu couvert, hydrogramme aigu et, souvent, assez faible coefficient de ruissellement; celui de fin de saison des pluies (FSP) avec une couverture végétale assez dense, un coefficient de ruissellement assez fort et un hydrogramme mou. On considérera surtout le premier hydrogramme pour les bassins sahéliens, le second pour les bassins tropicaux. Le diagramme de distribution a toujours été étudié uniquement pour les fortes crues; on a éliminé de cette étude les diagrammes correspondant à un ruissellement qui ne couvre qu'une partie du bassin sauf lorsque ceci est caractéristique du bassin et de la région (car des bassins de HAMZA et d'ALOKOTO).

On a hésité sur le choix du paramètre susceptible de caractériser l'hydrogramme : soit le temps de montée, temps compris entre le début de la crue et le maximum, soit le temps de base ou de ruissellement compris entre le début et le fin du ruissellement superficiel. Ces temps sont déterminés uniquement sur les crues unitaires, c'est-à-dire théoriquement pour des averses courtes et intenses. Il est souvent délicat de les déterminer avec précision. De l'ensemble des crues, il faut rejeter celles qui ne sont pas unitaires (temps trop longs ou au contraire trop courts à cause d'un ruissellement partiel). Pour le temps de base, la séparation entre ruissellement et écoulement hypodermique est parfois arbitraire, de sorte qu'on ne sait pas toujours si la fin de l'hydrogramme de ruissellement est bien du ruissellement ou une autre forme d'écoulement.

Nous avons déterminé les deux temps et les avons étudiés à fond pour le régime sahélien.

Nous avons représenté, comme dans le paragraphe précédent, les temps de montée en fonction des superficies des bassins et divisé ceux-ci en 3 catégories :

#### a) Régimes subdésertiques et sahéliens

On trouvera, sur les figures 10 et 11, les courbes de variations du temps de montée et du temps de base en fonction de la superficie. On a vite reconnu que l'influence

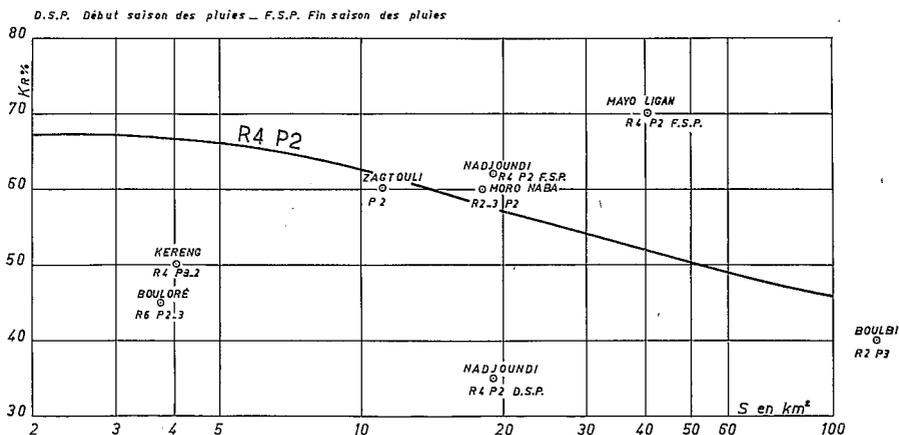


Fig. 7 — COEFFICIENT DE RUISSellement — Régimes tropicaux et tropicaux de transition — Perméabilité P2

de la perméabilité  $P$  était peu importante pour une catégorie donnée, ce qui est logique puisque, une fois le sol saturé, tous les sols sont semblables (en toute première approximation) en ce qui concerne la vitesse du ruissellement. On a donc tracé 4 courbes pour  $R_2, R_3, R_4$ , et  $R_5$ . Chaque point représentatif porte les deux mentions  $R$  et  $P$ . On constate encore une notable dispersion qui, généralement, s'explique. Signalons trois causes principales :

- l'allongement anormal des bassins : SEBIKOTANE (43km<sup>2</sup>);
- les galeries denses à l'aval : KOUMBAKA I;
- les bassins qui ne ruissellent jamais en totalité : SEBIKOTANE, YOLDE, KAOUN.

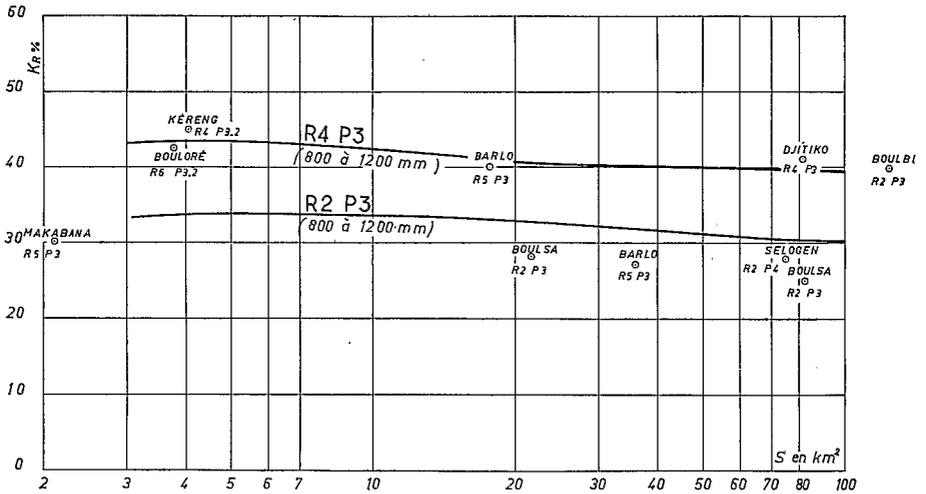


Fig. 8 — COEFFICIENT DE RUISSellement — Régimes tropicaux et tropicaux de transition — Perméabilité  $P_3$

Intervient également dans la dispersion le fait que certains bassins présentent des pentes intermédiaires entre  $P_2$  et  $P_3$ , par exemple.

On notera la position très aberrante des points de fin de saison des pluies; BOULSA (FSP), NADJOUNDI (FSP) que nous n'avons portés sur ce diagramme que pour bien montrer la différence avec les points DSP.

On se souviendra que ces points correspondent à des averses unitaires. Ces averses ne sont pas décennales pour les bassins :

- $R^2$  inférieurs à 2 km<sup>2</sup>;
- $R_3$  » à 3 km<sup>2</sup>;
- $R_4$  » à 15 km<sup>2</sup>;
- $R_5$  » à 25 km<sup>2</sup>.

Bien entendu, ces diagrammes sont valables pour des bassins de forme pas trop allongée avec un réseau hydrographique de forme ni trop favorable, ni trop défavorable au ruissellement.

Il est bien entendu que si un marécage se trouve sur le cours de la rivière principale d'un bassin  $R_4$ , les temps de montée et de base s'en trouveront sérieusement augmentés. Il suffit de comparer les bassins du DOUNFING pour lequel il y a quelques bas-fonds marécageux et du Mayo KERENG où il n'y en a pas.

On a estimé les valeurs du rapport  $K$  entre temps de base et temps de montée pour les bassins sahéliens et subdésertiques. On aboutit au tableau suivant où les temps sont indiqués en heures et dixièmes ou centièmes d'heures pour les bassins de divers facteurs  $R$  :

		2 km <sup>2</sup>	5 km <sup>2</sup>	10 km <sup>2</sup>	20 km <sup>2</sup>	50 km <sup>2</sup>	100 km <sup>2</sup>
$R_2$	$T_b$			17	24	35	
	$T_m$			3,6	5,6	10	
	$K$			4,7	4,3	3,5	
$R_3$	$T_b$	3,75	5,75	8,5	12,1	20	28
	$T_m$	0,85	1,33	2	2,85	4,6	6,63
	$K$	4,4	4,3	4,3	4,2	4,3	4,2
$R_4$	$T_b$	2,7	3,5	4,6	6,3	9,1	11,5
	$T_m$	0,5	0,73	1	1,4	2	2,53
	$K$	5,4	4,8	4,6	4,5	4,55	4,55
$R_5$	$T_b$	1,4	1,7	2,4	3,4	5,2	6,7
	$T_m$	0,2	0,3	0,47	0,73	1,18	1,55
	$K$	7	5,7	5,1	4,65	4,40	4,32

Le rapport  $K$  varie peu. Il décroît depuis les très petits bassins pour atteindre une valeur comprise entre 4,5 et 4,2.

Cette décroissance est surtout sensible pour les bassins à forte pente  $P_5$ . A ce point de vue, un bassin de 10 à 20 km<sup>2</sup> de catégorie  $P_2$  est semblable à un bassin de 20 à 50 km<sup>2</sup> en catégorie  $P_3$  et à un bassin de plus de 100 km<sup>2</sup> en catégorie  $P_4$  ou  $P_5$ .

Sur certains très petits bassins à forte pente, on note des valeurs anormalement faibles du temps de montée, cas du Mayo KERENG, par exemple. Elles correspondent au phénomène de la vague ou du mascaret. L'écoulement provenant des parties les plus éloignées du bassin chemine plus rapidement que celui des parties les plus rapprochées du bassin qui se traîne sur un lit sec et le rattrape. Dans un tel cas, il est évidemment difficile de donner des règles de calcul précises pour le temps de montée.

#### b) Régimes tropicaux et tropicaux de transition

On a tracé, comme plus haut, les courbes de variations du temps de montée et du temps de base. On a utilisé les données des bassins situés vers la limite sahélienne-

tropicale, déjà prises en compte dans l'étude précédente. A partir de l'isohyète 900 mm jusqu'à l'isohyète 1 100 mm, nous avons utilisé de préférence les données de la fin de la saison des pluies. Plus au Sud, cela n'a guère d'importance.

La dispersion semble plus forte que pour la catégorie précédente : ceci doit tenir à la présence de galeries forestières. Cela est très visible, par exemple, pour les bassins de TIAPALOU et du WENOU qui présentent les mêmes caractéristiques que celui du GORI BOUNIEROU, mais ce dernier n'a pas de galerie forestière.

Les bassins très cultivés de KORHOOG et du SOLOMOUGOU présentent des temps de montée très courts comparables à ceux des bassins sahéliens.

De façon générale, les temps de montée sont plus longs que pour les bassins tropicaux. Ceci est dû à l'effet de freinage de la végétation.

Ceci est moins net pour les bassins de plus de 25 km<sup>2</sup> et les bassins à faible pente  $R_2$  et  $R_3$ , car la dégradation hydrographique intervient sur les bassins sahéliens, freinant l'écoulement dans les lits, alors que sur les parties amont il avait été plus rapide qu'en régime tropical.

Les temps de base tropicaux sont plus courts. Ceci est dû en partie à la façon dont on a séparé le ruissellement de l'écoulement hypodermique car, en régime tropical, il y a presque toujours un écoulement hypodermique. On tend à déterminer un temps de ruissellement trop court, alors qu'en régime sahélien on néglige souvent l'écoulement hypodermique en l'englobant avec le ruissellement, ce qui conduit à des temps de base trop longs.

Mais la dégradation des lits de la région sahélienne intervient également et ceci est d'autant plus visible pour les bassins à faible pente  $R_2$  et  $R_3$ .

On a calculé le rapport  $K$  entre temps de base et temps de montée : il varie généralement entre 4,2 et 5,7 mais il serait illusoire de discuter sur les variations de ce coefficient, les réseaux de courbes 12 et 13 ne sont pas déterminés avec assez de sûreté.

### c) Bassins forestiers

Ils sont trop peu nombreux pour qu'il soit possible de tracer un réseau de courbes.

On trouvera, ci-après, le tableau indiquant, pour ces bassins, les deux indices  $R$  et  $P$ , la superficie  $S$ , le temps de montée  $T_m$  et le temps de base  $T_b$  :

Bassins	Indices	$S$ en km <sup>2</sup>	$T_m$	$T_b$
NION	$R_6 P_6$	10	6 h	16 h
	$R_5 P_6$	62	30 h	80 h
GBOA	$R_6 P_6$	11,5	3 h 30	17 h
LOUE	$R_6 P_6$	17	3 h	13 h
LEYOU	$R_5 P_4$	6	2 h 15	17 h 45
AGBEBY	$R_4 P_6$	11	3 h 30	11 h
IFOU	$R_3 P_5$	38	7 h	17 h
BIBANGA	$R_2 P_4$	25,2	19 h	35 h
BAFO	$R_2 P_4$	27	13 h	40 h
SITOU	$R_2 P_4$	29	13 h	26 h
MANSO	$R_2 P_3$	92	15 à 20 h	52 h

On s'est efforcé d'implanter les bassins dans les zones à plus forte pente possible; les quatre premiers bassins sont de véritables bassins de montagne. Malheureusement,



plus unitaire. Ceci est valable presque exclusivement pour les bassins sahéliens à pentes modérée, forte et surtout très forte pour lesquelles le temps de base est très court. On emploie, pour ces très petites surfaces, des éléments de courbes se raccordant aux courbes de la figure 11.

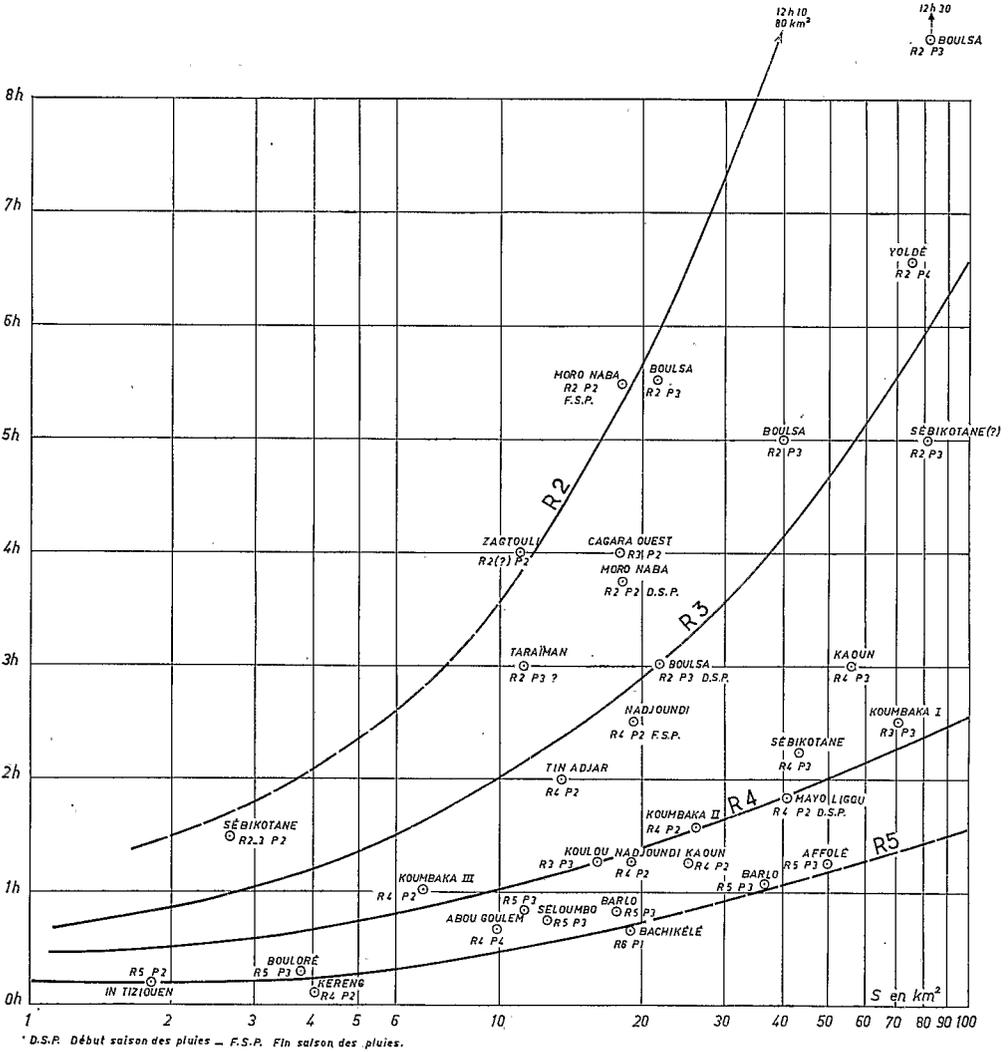


Fig. 10 — Temps de montée en fonction de R et de S — Régimes sahéliens — sub-désertiques

Ils peuvent être simplement définis par leur ordonnée correspondant à l'abscisse 2 km² et leurs points de raccordement aux courbes de la figure 11. Les abscisse des points de raccordement ont été données plus haut; les ordonnées du point S = 2 km²

sont les suivantes : pour  $R_5$  2 h, pour  $R_4$  3 h 15, pour  $R_3$  4 h 35 et pour  $R_2$  6 h 30. Ces courbes sont d'ailleurs déterminées avec fort peu de précision et elles correspondent à descas moyens en ce qui concerne la forme du bassin et les caractéristiques du réseau hydrographique.

Le calcul des valeurs de  $Q/M$  pour les bassins expérimentaux étudiés a mis en évidence une importante dispersion. Comme on pouvait le prévoir, le nombre de bassins dont on dispose ne permet pas de procéder à une étude systématique en fonction des

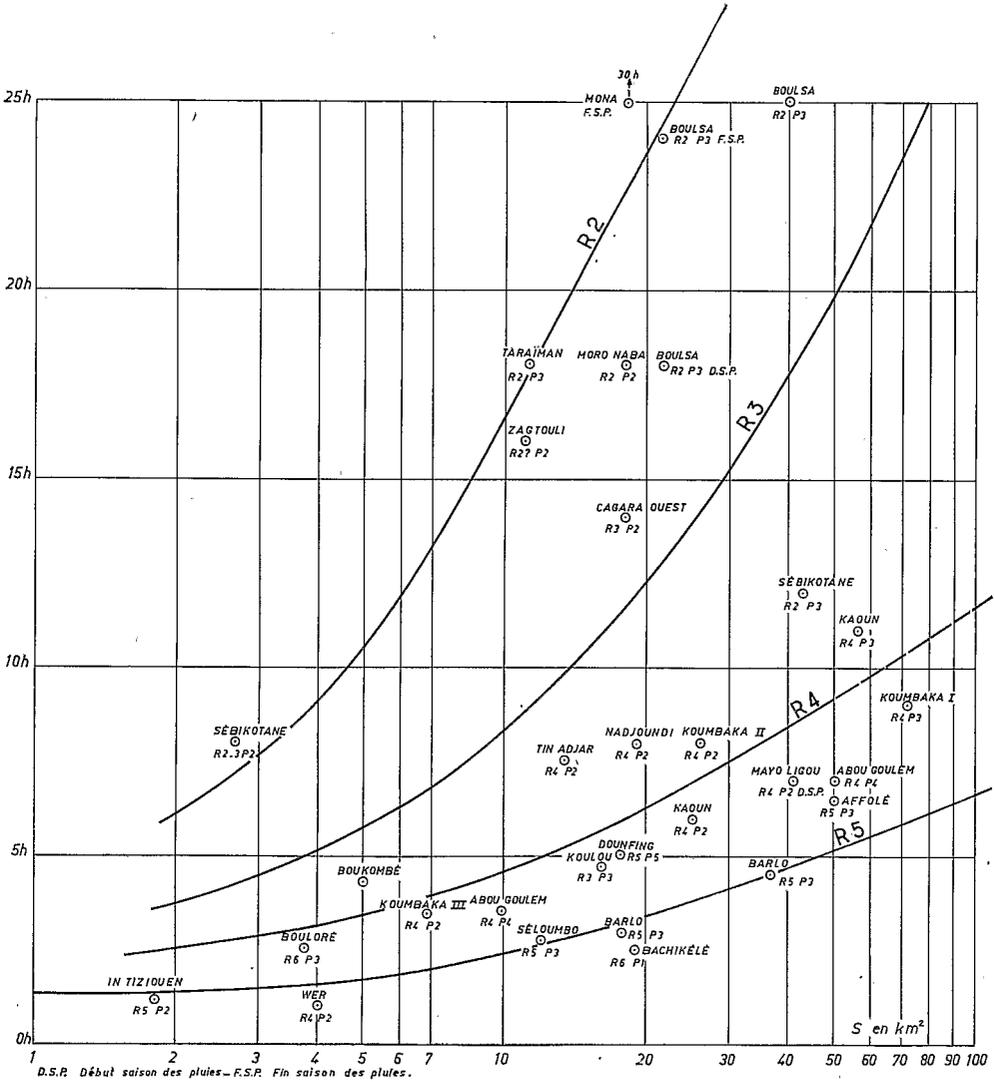


Fig. 11 — Temps de base en fonction de  $R$  et de  $S$  — Régimes sahéniens — sub-désertiques

divers facteurs. La courbe de variation moyenne est jalonnée par les points suivants, pour le régime sahélien :

2 km <sup>2</sup>	10 km <sup>2</sup>	25 km <sup>2</sup>	50 km <sup>2</sup>	100 km <sup>2</sup>
2,6	2,6	2,5	3	3,10

La croissance de  $Q/M$  des bassins de 25 km<sup>2</sup> à ceux de 100 km<sup>2</sup> s'explique par le fait que la base de l'hydrogramme s'allonge dans un réseau de moins en moins adapté à l'écoulement au fur et à mesure que la surface du bassin augmente, alors que la partie

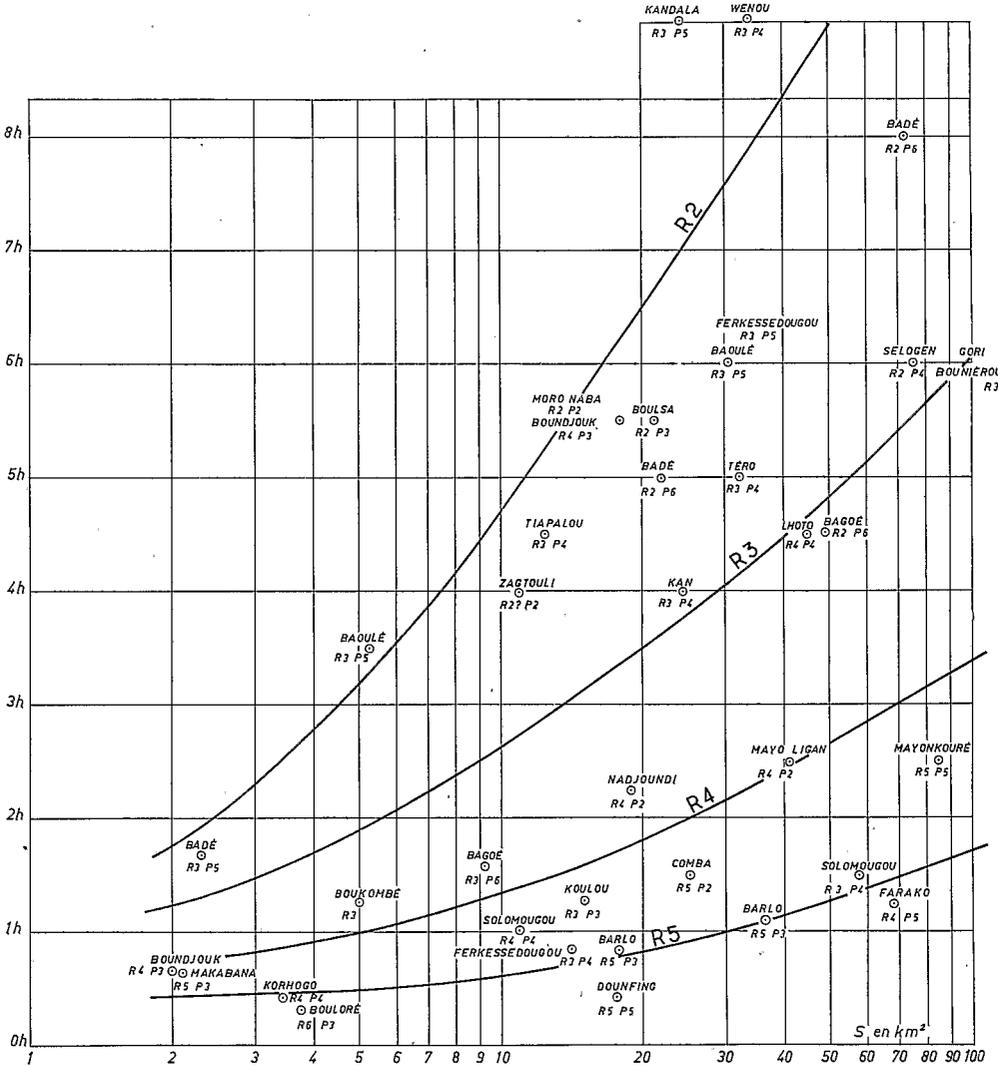


Fig. 12 — Temps de montée en fonction de R et de S — Régimes tropicaux et tropicaux de transition



catégorie et dans le cas de réseau hydrographique propice au ruissellement (réseau en éventail), d'utiliser les chiffres suivants :

2 km <sup>2</sup>	10 km <sup>2</sup>	20 km <sup>2</sup>	50 km <sup>2</sup>	100 km <sup>2</sup>
3	3	3	4,5	4

Pour les bassins tropicaux et tropicaux de transition, on pourrait adopter pour  $Q/M$  la valeur 2,5, quelle que soit la superficie du bassin sans risquer de très graves erreurs.

Pour les bassins équatoriaux,  $Q/M$  est généralement faible, correspondant à des hydrogrammes très arrondis. On trouve généralement des chiffres variant entre 1,3 et 2,5. On pourrait adopter :

$$\frac{Q}{M} = 1,7$$

#### CALCUL DES CRUES DÉCENNALES

On dispose ainsi de tous les éléments pour ce calcul :

Considérons un bassin versant de 50 km<sup>2</sup>, classé en  $R_4 P_2$ , en zone sahélienne sous l'isohyète 700 mm. L'averse décennale ponctuelle est de 105 mm par 24 h (en fait, l'averse dure à peine 3 h). Pour une surface de 50 km<sup>2</sup> et une averse ponctuelle de 105mm, le coefficient de réduction est de 80%. L'averse moyenne sur le bassin est de 84 mm. Le coefficient de ruissellement pour  $R_4 P_2$ , sur la figure 4, est de 52,5%. La lame d'eau ruisselée est de 44 mm, le volume ruisselé de 2 200 000 m<sup>3</sup>. Le temps de base lu sur la figure 11 est de 9 heures.

$$M = \frac{2\,200\,000}{9 \times 3\,600} = 68 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\frac{Q}{M} = 4,5$$

$$Q = 68 \times 4,5 = 305 \text{ m}^3/\text{s}$$

soit 6 000 l/s.km<sup>2</sup>, ce qui correspond aux chiffres déjà trouvés sur les bassins analogues.

Pour les bassins  $P_2$ , il n'y a pas à ajouter d'écoulement hypodermique.

#### CONCLUSIONS

L'étude dont nous avons extrait les principaux résultats ne doit être considérée que comme un premier essai d'interprétation générale des données relatives aux fortes crues recueillies sur nos bassins expérimentaux et représentatifs.

Bien des facteurs secondaires ont été négligés, notamment la forme du bassin et les caractéristiques principales du réseau hydrographique. Il a été nécessaire de considérer, pour ces facteurs secondaires, des situations moyennes. La répartition des bassins en catégories  $R$  et  $P$  est un procédé primitif qui demande à être amélioré. Certains bassins expérimentaux, étudiés il y a longtemps, demandent une nouvelle analyse suivant les méthodes actuelles. Enfin, le coefficient de ruissellement a été étudié pour l'averse décennale, ce qui rend nos résultats pas très homogènes puisque, pour une même zone, ils sont déterminés pour des hauteurs de précipitations différentes; en outre, l'utilisation de ces données est malaisée pour des pays autres que ceux où ont été installés les bassins. On constate ici tout l'intérêt qu'il y aurait à définir sur le plan régional ou plutôt subrégional des averses types, par exemple 100 mm, avec un hyétogramme et

une valeur de l'indice de précipitation antérieure bien définis pour lesquels seraient calculées les diverses caractéristiques de la crue; on pourrait ainsi comparer très facilement un bassin versant à celui d'un autre pays et mettre ainsi en commun les données des bassins représentatifs et expérimentaux. Ceci nécessite également des méthodes d'analyse pas trop différentes, donc au moins un petit début de normalisation. Dans le cas présent, le problème est très simple : tous les bassins ont été étudiés pratiquement par une seule équipe ou avec ses conseils. Un cas similaire est celui des bassins expérimentaux de l'Afrique Orientale où une excellente coordination inter-états et inter-services a permis l'application de méthodes uniformes.

Remarquons, pour terminer, l'intérêt que présente l'exploitation des bassins expérimentaux pour l'étude des fortes crues. Pour arriver aux mêmes résultats approximatifs, il aurait été nécessaire d'exploiter pendant au moins 15 ans plusieurs centaines de bonnes stations de jaugeage sur bassins de 2 à 100 km<sup>2</sup> et ce dispositif n'aurait pas fourni de données suffisantes sur l'intensité des précipitations, leur répartition spatiale, l'évaporation, le bilan hydrologique et l'érosion, comme on a pu l'obtenir par l'aménagement de ces bassins expérimentaux ou représentatifs.

Hydr.

**J.A. RODIER**

et

**C. AUVRAY**

**PREMIERS ESSAIS D'ÉTUDE GÉNÉRALE  
DU RUISSELLEMENT SUR LES BASSINS  
EXPÉRIMENTAUX ET REPRÉSENTATIFS  
D'AFRIQUE TROPICALE**

EXTRACT OF PUBLICATION N° 66

SYMPOSIUM OF BUDAPEST 1965

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF SCIENTIFIC HYDROLOGY

B 12651