

Paramètres caractéristiques des fortes crues dans les régions tropicales sèches

Première partie. Coefficient de ruissellement

Jean RODIER (1)

RÉSUMÉ

Dans le cadre d'une révision générale des données sur les fortes crues des petits bassins d'Afrique occidentale et centrale : bassins représentatifs et certaines stations du réseau hydrométrique, l'auteur a estimé pour les régions tropicales sèches les coefficients de ruissellement superficiel K_r 100 mm et K_r 70 mm qui correspondent à des pluies standard de 100 mm et 70 mm tombant dans des conditions bien définies.

On présente dans cet article les principaux résultats de cette étude et plus particulièrement les variations du coefficient K_r 100 mm en fonction des facteurs conditionnels du bassin dont le rôle est le plus important : la surface S , l'indice d'infiltrabilité P , et l'indice global de pente I_g corrigé si nécessaire en fonction des pentes transversales.

Pour des valeurs fixes de ces deux indices, la courbe de K_r 100 mm, en fonction de S , peut être représentée par une branche d'hyperbole dont on donne l'équation dans les différents cas. La dispersion des points représentatifs est forte par suite de l'influence d'autres facteurs qui n'ont pas été pris en compte. Les formules doivent donc être utilisées avec un questionnaire tenant compte de ces derniers facteurs.

MOTS CLÉS : Ruissellement superficiel — Petits bassins versants — Coefficients de ruissellement — Relations pluies/débits — Régimes tropicaux — Régions semi arides — Crues.

ABSTRACT

HIGH FLOOD CHARACTERISTIC PARAMETERS IN TROPICAL DRY AREAS. PART ONE — SURFACE RUNOFF COEFFICIENT

In the framework of a general review concerning the high floods data of the small basins of West and Central Africa : representative basins and hydrometric network stations records, the author has estimated for tropical dry areas the surface runoff coefficients K_r 100 mm and K_r 70 mm for standard precipitations with 100 mm and 70 mm depths, falling in well defined conditions.

The main results of this study are presented in this paper, principally the variations of runoff coefficient K_r 100 mm in relation to the physiographic factors of the basin whose influence are the most important on floods : area S , infiltrability index P and Global slope index I_g modified if necessary in relation to transversal slopes. For given values of these two indices the curves representating K_r 100 mm versus the area S may be represented by an hyperbole branch whose equation is given for the different values of P and I_g . The scattering of representatives points is high due to factors which have not been taken into account. The formulae must be used jointly with a check list giving the corrections corresponding to these factors.

KEY WORDS : Surface runoff — Small basins — Surface runoff coefficient — relationships rainfall-runoff — Tropical regimes — Semi arid areas — Floods.

(1) Ancien chef du service hydrologique de l'Orstom, 39 rue La Parée, 55470 Brétignolles-sur-Mer.

1. INTRODUCTION

Depuis une quarantaine d'années, une masse importante de données sur les paramètres des fortes crues a été accumulée en ce qui concerne les petits et moyens cours d'eau de l'Afrique de l'Ouest et d'une partie de l'Afrique centrale.

Ces informations ont été recueillies par l'observation de bassins représentatifs ou expérimentaux, par l'exploitation des réseaux météorologiques et hydrologiques, par des recherches très fines dans diverses disciplines ayant à intervenir dans la genèse des crues, par des études extensives de terrains et, enfin, par des études pratiques en vue d'équipements bien définis.

Quel que soit l'objectif de ces études ou de ces recherches, il y a presque toujours des éléments intéressants à recueillir pour une meilleure connaissance des débits des plus fortes crues.

Un certain nombre d'ouvrages à caractère de synthèse ont été publiés ou sont à l'impression. Le plus ancien et le plus important est le recueil des bassins représentatifs publié par P. DUBREUIL et ses collaborateurs en 1972. Il reprenait, en les améliorant parfois, les résultats des rapports d'études et un très gros effort avait été fait pour présenter autant que possible tous les caractères physiques et climatiques des bassins de façon homogène et logique.

Mais depuis 1972 d'autres bassins représentatifs ont été aménagés, d'autres études extensives ont vu le jour, des méthodologies nouvelles de recherches ou de calcul ont été élaborées, et un bon nombre de thèses dont certaines brillantes ont bien mis en lumière la plupart des phénomènes entrant en jeu dans la genèse des crues.

Il convenait donc de remettre à jour l'information diffusée par ce recueil et, ce qui est aussi important, de réviser depuis les pluies et les débits observés tout le cheminement qui conduisait aux divers paramètres publiés en 1972 et par la suite, avec *la même méthodologie* en tenant compte, dans toute la mesure du possible, de l'acquis scientifique de 1972 à nos jours.

À la demande du CIEH, nous avons effectué ce travail de 1985 à 1991 pour le Sahel avec la collaboration ou les conseils éclairés de P. RIBSTEIN, B. POUYAUD et A. CASENAVE. Les cours d'eau concernés par cette étude contrôlaient des bassins de 0,2 km² à plus de 2 000 km², et l'ouvrage présentant les résultats définitifs de ces travaux est actuellement en préparation.

En 1992, le CIEH nous demandait de procéder à la même révision pour la zone tropicale sèche, de l'isohyète annuelle 750-850 mm à l'isohyète 1 200-1 250 mm. La première partie de cette tâche, l'analyse des données, est actuellement terminée, et nous procédons à une première synthèse en vue de fournir quelques éléments pour la pré-détermination de ces paramètres dans le cas de bassins non observés. Cette seconde révision concerne 130 bassins versants dont l'implantation et la superficie sont précisées dans les tableaux I (a, b, c, d) et sur la fig. 1 (p. 141 à 145). On trouvera dans l'annexe 1 (p. 157) l'ensemble des données révisées pour 38 d'entre eux, sélectionnés comme nous l'avons indiqué plus loin dans le paragraphe, variation de Kr 100 mm.

Ces deux séries de travaux relatifs au Sahel et à la zone tropicale sèche ne font que compléter un bon nombre de synthèses menées à bien par les hydrologues de l'Orstom et du CIEH.

Nous ne citerons que la dernière concernant la mise en valeur des bas fonds de l'Afrique de l'Ouest (ALBERGEL *et al.*, 1993) qui vient d'être achevée et qui nous a apporté de précieuses informations. On ne doit pas oublier un certain nombre de monographies hydrologiques de grands fleuves ou de pays dans lesquelles l'étude critique des données a été très poussée, ce qui nous a permis de présenter les données de quelques stations des réseaux.

Cependant ces ouvrages ne couvrent qu'une partie de la surface géographique ou qu'une partie des aspects des processus hydrologiques qui nous intéressent ; ils ne contiennent pas toujours la totalité de l'information disponible sur les bassins représentatifs et, enfin, pour ces derniers ils ne remettent pas en question l'interprétation des données de terrains aboutissant aux paramètres que nous cherchons à établir (interprétation qui, dans certains cas, est bien ancienne).

En revanche, d'après leur nature, ils fournissent souvent beaucoup d'informations sur le contexte géographique, donnent beaucoup plus de détails sur certains points particuliers et vont beaucoup plus loin dans l'interprétation scientifique comme dans les recommandations en vue d'applications pratiques.

Dans ce qui suit, on s'intéresse à un élément essentiel de la fonction de production : le coefficient de ruissellement : rapport entre la lame ruisselée Hr et la hauteur de pluie moyenne responsable de la crue.

La fonction de transfert fera l'objet d'une seconde partie, publiée dans le prochain numéro d'Hydrologie continentale.

2. QUELQUES DÉFINITIONS

Ce qui suit est bien connu de nombreux hydrologues, mais il y a tout intérêt à préciser nos concepts de départ, sinon nous risquerions de sérieux malentendus.

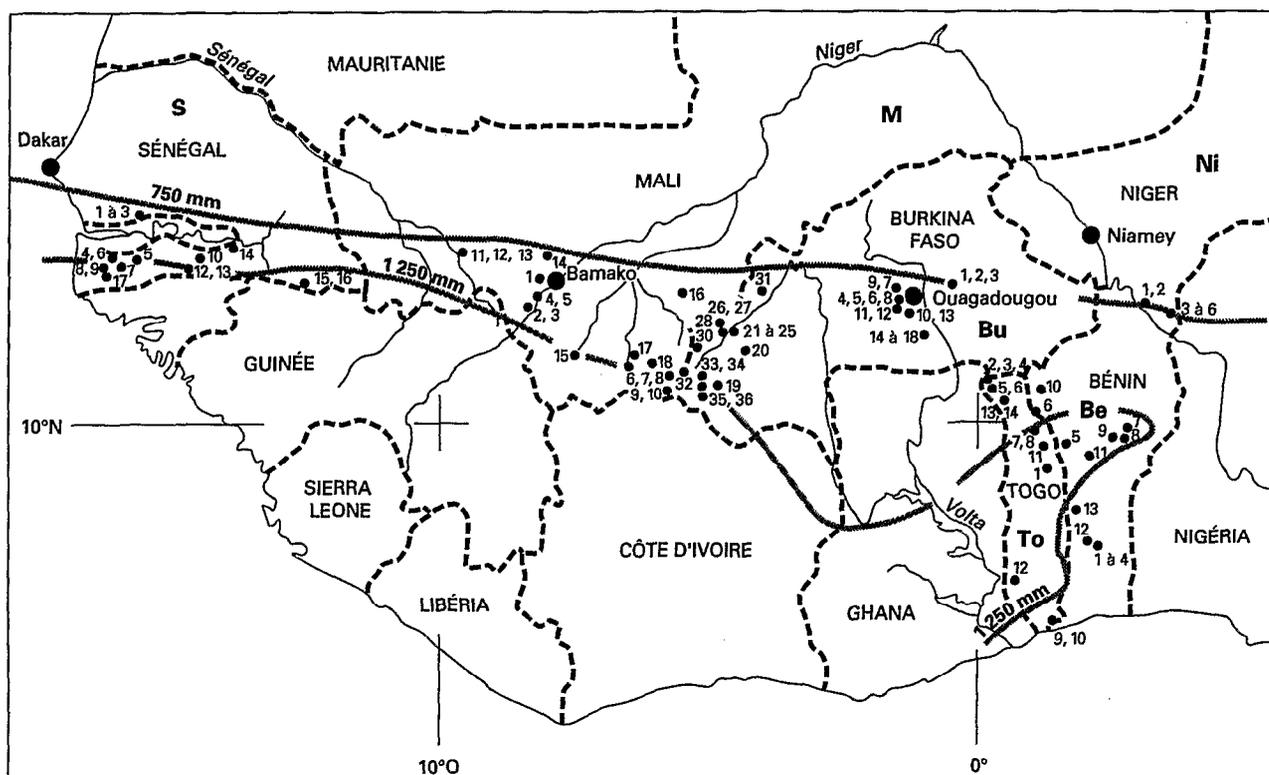


FIG. 1 a. — Implantation des bassins étudiés — Afrique de l'Ouest.

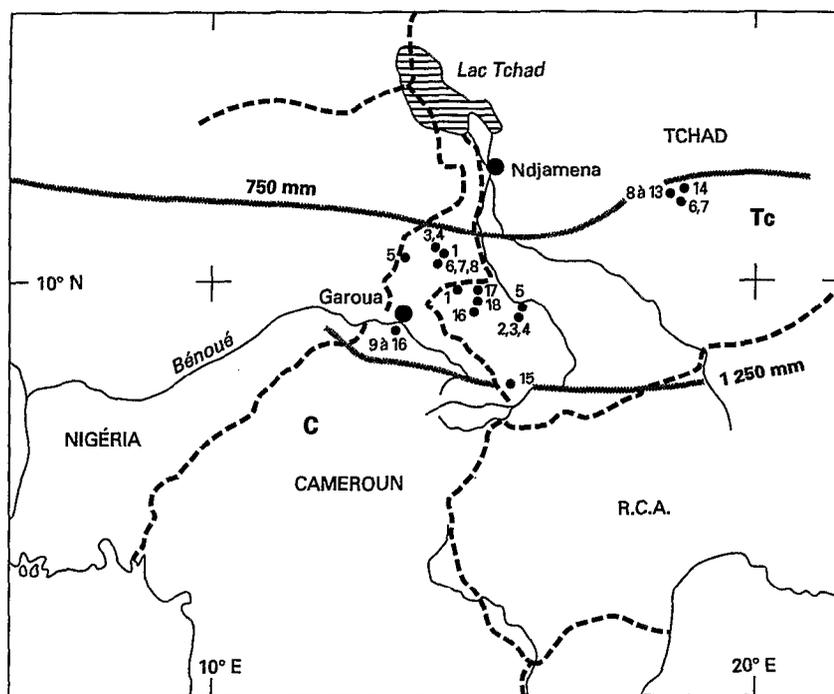


FIG. 1 b. — Implantation des bassins étudiés — Afrique centrale.

TABLEAU I a
Situation des bassins étudiés (Sénégal-Mali)

Bassin n°	S km ²	Latitude	Longitude	Bassin n°	S km ²	Latitude	Longitude
SÉNÉGAL							
Keur Dianko S1	0,58	13°45'N	15°33'O	Fafakourou S10	700	13°33'N	14°33'O
Ndiar-Gueness S2	0,90	13°45'	15°33'	Thiangol Dianguina S11	815	12°50'	14°45'
Ndiba S3	16	13°45'	15°33'	Khorine Omar Madina S12	385	12°51'	14°51'
Toukara S4	324	13°05'	16°08'	Sare Koutayel S13	640	12°55'	14°33'
Boukiling S5	200	13°02'	15°42'	Sima S14	495	13°15'	13°55'
Djionaye S6	11	12°59'	16°08'	Thiokoye S15	950	12°34'	12°32'
Diango S7	135	12°53'	16°04'	Diarha S16	760	12°36'	12°37'
Sindian S8	11,9	12°52'	16°11'	Le Brusq S17	2,6	12°40'	16°12'
Sandougou S9	84,7	12°57'	16°11'				
MALI							
Dounfing M1	17,5	12°41'N	8°03'O	Kambo amont M9	4,7	10°37'N	5°48'O
Djitioko M2	92,3	12°07'	8°25'	Kambo aval M10	10	10°37'	5°48'
Koba M3	1 052	12°07'	8°25'	Seme I red. M11	5	13°06'	9°33'
Barraro Tenaya M4	39	12°20'	8°16'	Seme I Tot. M12	9	13°06'	9°33'
Barraro Krina M5	251	12°20'	8°16'	Seme II M13	5,3	13°06'	9°33'
Farako Red M6	(25)	11°	5°35'	Diarabougou M14	20,6	13°03'	7°59'
Farako tot M7	68	11°	5°35'	Belekoni M15	120	11°21'	7°29'
Kobafini Loulouni M8	800	10°54'	5°20'	Koutiala M16	25	12°23'	5°29'
				Dekorobougou M17	736	11°16'	6°26'
				Kobi M18	270	11°08'	6°05'

TABLEAU I b
Situation des bassins étudiés (Burkina Faso)

Bassin n°	S km ²	Latitude	Longitude	Bassin n°	S km ²	Latitude	Longitude
BURKINA							
Koghneré Bu1	19,8	12°33'N	0°38'O	Comoe Karfiguela Bu19	812	10°44'N	4°50'O
Porogaya Bu2	84,7	12°33'	0°38'	Kou Badara Bu20	971	11°22'	4°22'
Koulouoko Bu3	1 010	12°33'	0°38'	Kuo Bu21	60,4	11°40'	4°45'
Moro Naba Bu4 Bu5	19,1	12°20'	1°30'	Dougbe Bu22 Bu23	19	11°41'	4°44'
Ouagadougou Bu6	294	12°22'	1°38'	Ouzou Bu24 Bu25	75,6	11°44'	4°38'
Lumbila Bu7	2 120	12°27'	1°36'	Konga Bu26 Bu27	165	11°47'	4°41'
Kamboense Bu8	137	12°18'	1°40'	Dongo Bu28 Bu29	158	11°43'	4°49'
Donse Bu9	182	12°35'	1°23'	Seledogo Ngorolani Bu30	654	11°31'	5°09'
Selogen Bu10	74	12°01'	1°20'	Keralie Tenekuy Bu31	875	12°25'	4°10'
Boulbi Bu11	125	12°14'	1°35'				
Nabagale Bu12	471	12°11'	1°31'	Badini amont Bu32	90,8	10°38'	5°11'
Gogen Bu13	30	12°06'	1°23'	Leraba Douna Bu33	820	10°50'	5°10'
Binnde Bu14	9,7	11°44'	1°06'	Leraba Niofila Bu34	710	10°50'	5°10'
Kazanga Bu15	54,8	11°43'	1°02'	Kawara Bu35	99,8	10°35'	5°11'
Zaptinga Bu16	15,1	11°42'	1°05'	Pingole Bu36	112	10°33'	5°09'
Loure Bu17	98	11°40'	1°02'				
Niarba Bu18	572	11°40'	1°00'				

TABLEAU I c
Situation des bassins étudiés (Togo-Bénin-Niger)

Bassin n°	S km ²	Latitude	Longitude	Bassin n°	S km ²	Latitude	Longitude
Togo							
Sara To1	30	9°18'N	1°15'E	Hidenwou Sec To8	1,44	9°56'N	1°04'E
Koumfab To2	96,2	10°46'	0°13'	Lac Elia To9 S1	5,3	6°30'	1°37'
Koulou-Gouna To3	189	10°46'	0°13'	Lac Elia To10 S2	5,6	6°30'	1°37'
Napabour To4	61,4	10°46'	0°13'	Koza To11	19,2	9°39'	1°12'
Nadjoundi To5 To6	21,2	11°	0°10'	Daye To10	52	7°16'	0°43'
Hidenwou To7	25	9°56'	1°04'	Koimepou-Arbaga To13	208	10°36'	0°24'
				Laktaon To14	190	10°32'	0°19'E
BENIN							
Lhoto Moumoudji Be1	45	7°50'N	2°10'E	Tiapalou Be7	17,4	9°55'N	2°45'E
Lhoto Bohm Bhom Be2	12	7°50'	2°10'	Dodou Wenou Be8	33,4	9°43'	2°33'
Soussou Be3	7,4	7°50'	2°10'	Dodou Gori Bounierou Be9	120	9°49'	2°43'
Kolomandje Be4	13	7°50'	2°10'	Magou Be10	836	10°43'	1°12'
Tero Djougou Be5	32	9°41'	10°36'	Wewe Be11	293	9°23'	2°06'
Boukombe Be6	3,2	10°12'	1°08'	Klou Be12	300	7°53'	2°07'
				Omini Be13	88	8°28'	1°47'
NIGER							
Banigourou Ni1	17,3	12°14'N	2°58'E	Bangou Beri sec Ni4	0,5	11°56'N	3°32'E
Yolde Ni2	82,6	12°14'	2°58'	Tanagueye Ni5	75	12°04'	3°29'
D. Maouri Bangou Beri Ni3	12,5	12°00'	3°34'	Kote Kote nord Ni6	5	12°02'	3°31'

TABLEAU I d
Situation des bassins étudiés (Cameroun-Tchad)

Bassin n°	S km ²	Latitude	Longitude	Bassin n°	S km ²	Latitude	Longitude
CAMEROUN							
Boulore C1	3,75	10°38'N	14°18'E	Sanguere I C9	3,4	(9°10'N)	(13°26'E)
Kereng C2	4	9°49'	14°00'	Sanguere II C10	7,1	(9°10')	(13°26')
Leleng C3	4	10°44'	14°14'	Sanguere III C11	1,12	(9°10')	(13°26')
Godola C4	42	10°42'	14°13'	Sanguere IV C12	1,66	(9°10')	(13°26')
Mogode B C5	0,94	10°34'	13°34'	Sanguere V C13	27,1	(9°10')	(13°26')
Mouda I C6	18,1	10°26'	14°14'	Sanguere VI C14	3,2	(9°10')	(13°26')
Mouda II C7	0,003	10°26'	14°14'	Sanguere VII C15,C16	86,5	(9°10')	(13°26')
Mouda III	0,058	10°26'	14°14'				
TCHAD							
Mayo Ligan Tc1	41	9°53'	14°42'E	Mazera Tc12	316	11°56'	18°35'E
Bade I Tc2	5,36	8°31'	15°45'	Barlo V Tc13	528	11°56'	18°30'
Bade II Tc3	21,9	8°32'	15°45'	Bam Bam Tialo Zoudou Tc14	1 200	12°02'	18°37'
Bade III Tc4	72	8°33'	15°44'	Mataon Tc15	16,8	8°12'	15°37'
Bade IV Tc5	316	8°35'	15°50'	M. Dorbo Zamagouin Tc16	88	9°32'	14°58'
Tounkoul Tc6,Tc7	61,3	11°52'	18°44'	Zanini Torok Tc17	250	10°00'	15°00'
Bidjir Tc8,Tc9	74,2	11°54'	18°25'	M. Dorbo Balani Tc18	1 180	9°41'	15°00'
Taya Tc10,Tc11	167	11°55'	18°30'				

2.1. LE COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT

Le coefficient de ruissellement est le rapport entre la lame d'eau moyenne ayant ruisselé sur la surface du bassin et la lame d'eau moyenne apportée par la pluie.

Il est extrêmement rare que le ruissellement soit homogène de même que la hauteur de pluie mais on fait « comme si ». Cependant il y a des précautions à prendre, par exemple, lorsque la hauteur H_r de la lame ruisselée

devient inférieure à 4 ou 2 mm. On sait très bien qu'il y a de fortes chances pour que des parties très importantes du bassin n'aient pas ruisselé et par conséquent il faut en tenir compte sans en rester affecté outre mesure. Il convient de préciser par ailleurs ce que nous entendons par ruissellement : sur un petit bassin on trouve trois formes d'écoulement (P. CHEVALLIER, 1988, en distingue quatre).

— L'écoulement de base provient des réserves souterraines ou superficielles (réservoirs, mares, une partie du volume contenu dans le lit des cours d'eau, etc.).

— Le ruissellement superficiel qui coule à la surface du sol : *Lors des fortes crues* il se produit, tout au moins en Afrique tropicale, dans de très nombreux cas. On l'a vu, on l'a photographié, ce n'est pas une vue de l'esprit conduisant à des méthodologies plus ou moins séduisantes.

— L'écoulement intermédiaire : vidange des micro-mares, suintement autour des touffes d'herbe, égouttages des végétaux, première phase de la vidange du chevelu hydrographique et *parfois* un véritable écoulement hypodermique, écoulement oblique et non vertical à faible distance de la surface du sol.

Ajoutons avec P. CHEVALLIER (1988) une quatrième forme assez fréquente en régions tropicales sèches et surtout en régions tropicales humides : c'est un écoulement à la surface d'un sol perméable, saturé ou même recouvert d'un mince film d'eau, nous ferons comme si c'était du ruissellement superficiel (première forme).

Lorsque le bassin s'agrandit, le ruissellement superficiel peut subir bien des avatars, une partie peut être stockée dans des réservoirs naturels de diverses natures d'où il ne s'évade que lentement. Ce n'est qu'au moment des paroxysmes des crues, que, de ces réservoirs, sort un flot à écoulement rapide. Sur l'hydrogramme de crue, on distinguera encore une première partie avec *variation rapide de débit* correspondant à l'écoulement rapide, en fin de crue une variation lente du débit, c'est l'écoulement de base, et entre les deux un écoulement intermédiaire ou retardé.

À l'origine, il y avait du ruissellement superficiel pour approvisionner ces trois formes d'écoulement, au moins en partie pour les deux dernières.

2.2. LA LAME RUISSELÉE

La lame ruisselée H_r , dans ce qui suit, correspond : soit au ruissellement superficiel, soit à l'écoulement rapide à l'exclusion de toute autre forme d'écoulement (surtout l'écoulement retardé). Dans la plupart des rapports que nous avons vus, le « ruissellement » comprend l'écoulement retardé, il y avait de bonnes raisons de le faire. Mais, nous ne devons pas perdre de vue que ce qui crée la pointe de crue c'est l'écoulement rapide seul, et le fait de cumuler les deux formes d'écoulement accroît l'instabilité des durées de temps de « ruissellement » ou temps de base T_b , qui peut présenter déjà suffisamment de problèmes lorsqu'il est déterminé à partir du ruissellement superficiel seul.

On pourra objecter que, pour éviter la séparation entre les différentes formes de l'écoulement sur les divers hydrogrammes, on peut considérer au lieu du temps de base T_b , le temps caractéristique de base T_c , $T_c = \text{volume écoulé/débit maximum de la crue}$. Mais généralement on rencontre autant de difficultés pour trouver, avec des échantillons réduits de fortes crues, des valeurs stables de T_c que pour T_b . Heureusement que suivant les cas l'un est stable et l'autre ne l'est pas, mais ce n'est pas toujours exact.

Le fait d'éliminer l'écoulement retardé nous a amenés, à réviser les volumes « ruisselés » pour la plupart des bassins. mais nous tenions à ce que tous soient traités de la même façon. Le coefficient de ruissellement K_r est une donnée moins physique que la lame ruisselée H_r , mais pour les applications il est plus pratique, c'est pourquoi nous avons porté notre choix sur K_r plutôt que sur H_r . Cependant dans la plupart des cas, nous sommes partis des variations de H_r en fonction de la hauteur moyenne de précipitation et des autres facteurs conditionnels du ruissellement.

Il ne serait pas sérieux de chercher à fixer des valeurs repères du coefficient de ruissellement sans donner au moins une idée des conditions d'humidité du bassin juste avant l'averse correspondant à ce coefficient de ruissellement repère. Ceci ne peut être fait sans préciser les conditions de détermination des crues de projet et, par conséquent, sans définir le concept de la crue décennale.

2.3. LE CONCEPT DE LA CRUE DÉCENNALE

Pour le Sahel avec P. RIBSTEIN, nous avons indiqué que la crue décennale est une crue fictive dont les principales caractéristiques ont une période de retour de dix ans.

Pour préciser, c'est la crue provoquée par une pluie journalière de hauteur décennale, toutes les autres caractéristiques liées à cette averse correspondant aux valeurs les plus fréquentes pour les fortes précipitations observées (saturation du sol, état de la végétation, forme du hyétogramme).

Dans notre dernière analyse des données du Sahel, dont la publication est en préparation, nous avons admis pour les bassins pour lesquels l'influence de la saturation du sol est peu importante, que cette averse tombait vers le début de la saison des pluies DSP ; dans le cas contraire nous avons admis que l'averse tombait vers la fin de la saison des pluies FSP. On doit préciser que pour les très petits bassins on considérerait une tranche d'averse de 15 à 30 mm décennale qui constitue le corps d'une averse de hauteur totale modérée.

Pour les trop grands bassins, nous avons conservé la pluie journalière décennale qui, pour le débit maximal de l'hydrogramme, donne les mêmes résultats qu'un épisode pluvieux décennal de trois jours à cinq jours.

Sauf pour certains bassins à capacité de rétention notable, la crue décennale ainsi définie est très proche et souvent égale à la vraie crue décennale qui serait obtenue à partir de l'analyse statistique d'une série de 50 débits maximaux annuels.

En régions tropicales sèches l'influence de l'humidité du sol est nette et très forte sur la grande majorité des bassins ; il arrive même que ce soit le facteur principal de l'écoulement, la hauteur de précipitation étant facteur secondaire. Mais malheureusement, s'il y a une base statistique solide pour les précipitations, ce n'est pas le cas pour l'humidité du sol pour laquelle il n'existe pas d'indice tout à fait satisfaisant.

À l'échelle du bassin versant, c'est un problème trop complexe qui fait intervenir, à la fois, la surface du sol, l'état des nappes, le chevelu hydrographique, etc.

Ceci nous amène donc à modifier la définition de la crue « décennale » qui risque alors de s'éloigner un peu de la crue de période de retour dix ans.

Pour réduire cet écart au minimum voici la définition que nous avons retenue. Sans le dire, de nombreux hydrologues de l'Orstom l'ont employée depuis longtemps dans leurs rapports.

On ne peut parler des « conditions les plus fréquentes pour l'état de saturation des sols et du chevelu hydrographique » car la pointe de la crue « décennale » serait souvent beaucoup plus faible que la vraie pointe décennale. La crue décennale sera donc provoquée par une pluie journalière décennale survenant après une série d'averses notables vers la fin d'une *saison des pluies* légèrement excédentaire (qui peut se produire d'ailleurs au cours d'une année dont le *total annuel* est déficitaire).

Pour les bassins très perméables, nous avons même admis que l'averse se produisait au cours d'une année très nettement excédentaire ; ce sont donc des averses FSP mais pas les toutes dernières qui sont défavorisées.

Il existe cependant des bassins, dont une notable partie est imperméable, qui en tout début de la saison des pluies peuvent recevoir sur un sol sans couverture végétale de fortes averses.

Nous avons alors été amenés à étudier le comportement du bassin en FSP et en DSP ; mais *en tout début de la saison* la probabilité d'apparition d'une averse décennale est assez faible de sorte qu'on ne connaît plus très bien la probabilité de la crue qui en résulte.

Nous avons révisé les rapports de campagne des bassins en calculant les coefficients de ruissellement K_r pour des pluies journalières à maximum ponctuel de 100 mm ou 70 mm centré vers le centre du bassin, un peu vers l'aval pour les plus grands, soit K_r 100 mm et K_r 70 mm. Nous avons également déterminé K_r 10 qui correspond à la hauteur d'averse journalière décennale, même dans le cas d'assez grands bassins où la crue décennale est calculée sur la moitié aval ou dans les cas des plus petits où l'on part d'une tranche d'intensité décennale.

3. DÉTERMINATION DE P_m

La hauteur de pluie moyenne sur le bassin, P_m , est déterminée à partir de la hauteur ponctuelle P_p par l'abaque de G. VUILLAUME (1974).

La hauteur ponctuelle, P_p 10, décennale est déterminée dans la grande majorité des cas sur les cartes CIEH. Pour un petit nombre de bassins, où une étude fine et valable avait été faite pour P_p 10, nous avons retenu d'autres chiffres, par exemple sur la Daye (Togo) où l'influence de l'altitude conduit à des valeurs de P_p 10 plus faibles que sur les cartes CIEH et sur les bassins de Sanguéré (Cameroun) où nous avons admis le chiffre de Caroua, enfin sur les bassins du Bam Bam (Tchad).

Pour la répartition temporelle des intensités, nous avons admis un schéma simple, le même que pour le Sahel, fortement influencé par une étude faite à Ouagadougou (LE BARBE, 1982) à la limite sud du Sahel. Ceci joue surtout pour la détermination de la pluie utile P_u au-delà d'un seuil variant de 12 à 18 mm.h⁻¹ (5 mm.h⁻¹ pour le Sahel avec des sols imperméables beaucoup plus fréquents). La durée de la pluie utile est beaucoup plus courte que pour

les vraies pluies de mousson ; cela joue en faveur de la sécurité comme le choix que nous avons fait d'averses à corps unique ou à deux corps *très rapprochés*.

Enfin, pour les conditions de saturation du sol et du réseau, nous avons admis les mêmes principes que pour la crue décennale, ce qui nous a conduits à corriger les coefficients de ruissellement de bassins vers la limite sud du Sahel pour les adapter aux conditions du centre de la zone que nous étudions (P annuelle vers 1 000 mm).

Cela a été le cas pour les bassins de Boulsa (Burkina Faso) et de Badé (Tchad). Nous avons même dû revoir contre notre gré le bassin du Moro Naba (Burkina Faso) pour lequel, à première vue, les forts ruissellements évitaient cette correction ; mais l'influence de l'état de saturation du sol était trop forte, tout au moins en 1962.

Nous ne l'avons pas fait pour les autres bassins de Ouagadougou et pour ceux du Bam Bam dont l'étude était basée sur les très fortes crues de 1961 pour les premiers et de 1964 pour les seconds ; mais pour ce qui concerne les régions tropicales sèches, une légère sous estimation n'est pas exclue.

4. DÉTERMINATION DE Hr

La séparation des écoulements a été faite sur les hydrogrammes pour les plus fortes crues et les crues les plus intéressantes pour déterminer la forme de l'hydrogramme de ruissellement ; nous en avons déduit un coefficient moyen de réduction pour passer, soit de l'hydrogramme d'écoulement total, soit plus fréquemment de l'hydrogramme de ruissellement + écoulement retardé, à l'hydrogramme de ruissellement pur ou rapide. Ce coefficient varie de 0,7 à 0,95 et même 1 pour les bassins imperméables, plus généralement il est compris entre 0,75 et 0,85. On applique ce coefficient aux volumes « ruisselés » Vr ou aux lames « ruisselées » « Hr » pour les crues dont nous n'avons pas déterminé directement le volume de ruissellement pur Vr.

Dans tous les cas, nous avons tracé la partie haute de la courbe $Hr = f(P_m)$ correspondant en FSP à des conditions de saturations I_h précisées dans la définition de la crue décennale ; celle-ci est souvent très proche de la courbe enveloppe trouvée dans les publications où l'influence de I_h a été étudiée de façon approfondie comme pour les bassins du Bam Bam (Tc7, Tc9, Tc11). Dans deux ou trois cas, dans des régions relativement homogènes et avec de courtes durées d'observation nous avons utilisé la courbe d'un bassin analogue. Dans le tracé de cette courbe, il n'a pas été tenu compte de la position aberrante de certains points représentatifs correspondant à des conditions différentes des plus fréquentes pour les divers facteurs de l'écoulement autres que P_m et l'indice d'humidité choisi : rapports corps de l'averse/hauteur totale trop forte ou trop faible, épicycle de l'averse à l'extrémité amont ou aval etc.

Pour les bassins assez grands, il a été souvent difficile de séparer les écoulements de différentes averses successives, c'est même impossible dans certains cas.

5. FACTEURS CONDITIONNELS DE Kr 100 mm OU Kr 10

— En premier lieu, ce qu'on peut appeler la perméabilité globale du bassin : facteur très complexe faisant intervenir l'infiltrabilité des sols, les pertes dans le chevelu hydrographique, et la couverture végétale par ses effets directs :

— la superficie du bassin ;

— la pente ;

— la couverture végétale par ses effets directs et les cultures dont l'influence peut être très importante s'il s'agit de rizières ;

— les aménagements de toutes sortes ;

Très peu de ces facteurs peuvent être quantifiés correctement.

5.1. LA PERMÉABILITÉ GLOBALE

Elle peut être représentée par un indice.

Au Sahel, depuis les travaux de VALENTIN et CASENAVE (1989) et compte tenu du petit nombre de types d'états de surface on peut, à côté d'un faible indice global de perméabilité, donner un ordre de grandeur de la lame ruisselée par une surface donnée pour une averse type de 70 mm par exemple (RODIER, 1992).

Mais en région tropicale sèche on ne peut pas le faire de la même façon systématique. Toutefois des progrès très nets sont à noter puisqu'ALBERGEL *et al.* (1992) est parvenu à estimer le coefficient de ruissellement décennal (y compris l'écoulement retardé) à partir d'unités paysagistes comportant chacune divers états de surface en diverses proportions, pour la Casamance et d'autres régions.

Cependant, dans la plupart des cas, classer un bassin dans une catégorie déterminée de perméabilité est une opération en grande partie qualitative et souvent délicate.

Nous avons conservé les cinq indices que nous avons utilisés au Sahel (nous avons eu recours à certains éléments de détermination sur lesquels nous nous étions basés lors de cette première révision) :

- particulièrement imperméables PI (ancien P1 — P2) Bassin imperméable pour plus de 90 % de sa surface ;
- imperméables I (ancien P2) Bassin imperméable sur au moins 75 % de la surface ;
- relativement imperméables RI (ancien P3) ;
- perméables P (ancien P4). Peuvent contenir 5 à 10 % de sols peu perméables.
- très perméables TP (ancien P5).

Il y a des subdivisions $\overline{\text{R}}$, $\overline{\text{RI}}$, RI, RI, RI (RI, est équivalent à $\overline{\text{P}}$)

Deux difficultés importantes pour le classement :

a) Certains types de sols, tel le rocher nu ; le grès et les roches cristallines (nous donnerons surtout des exemples sahéliens). Le grès très fracturé ruisselle très peu en général : dans l'Adér Douchi, au Sahel, les plateaux de blocs de grès peuvent être considérés comme perméables. Au contraire, des grès beaucoup plus sains comme ceux de Bachikélé dans l'Ennedi (Tchad) ruissellent très bien, ceux de Koumbaka (Mali), affleurement plus ou moins noyés dans des sols peu profonds, sont très peu perméables. Sur les grès de Garoua (Sanguéré C14, Cameroun), on fait la même constatation sur le bassin VI pour les grès nus et les sols perméables peu profonds sur grès.

Il semble qu'il en est de même pour au moins la partie aval du bassin de la Comoé Bu12 (Burkina Faso). Mais à côté de cela, de nombreux massifs de grès fracturés sont très perméables, au Mali et au Burkina même s'ils ne sont pas recouverts de cuirasses latéritiques perméables.

Pour les roches cristallines c'est la même chose, les massifs de granite en boule de la Soussou Be3 (Bénin) sont très perméables, une partie du massif de blocs de gabbros de Kolel (mare d'Oursi, Burkina) est peu perméable, les blocs étant noyés dans un sol imperméable sur une partie du bassin.

Le bassin de Goutouré au Burkina présente une association comparable à celle du petit bassin de Koumbaka, les affleurements de grès étant remplacés par des affleurements de roches cristallines ce qui conduit à classer le bassin en PI.

Une partie du bassin de Barlo (Tchad) est constitué par la même association. Sans inspection du terrain on ne peut rien dire.

b) La seconde difficulté résulte du comportement différent des divers sols à de faibles pluies et aux fortes pluies survenant dans les conditions que nous avons précisées plus haut. Sur le bassin de la Koba M3 (Mali), on rencontre un massif de grès fissurés souvent recouvert de cuirasses latéritiques, puis des éboulis et des colluvions de bas de pente, perméables en surface, puis les fonds de vallées en général très habités et très cultivés avec des rizières et des sols parfois hydromorphes et imperméables vers l'aval. *A priori*, l'ensemble devrait être classé en RI plutôt faible ; mais en FSP, les colluvions deviennent imperméables, les fonds de vallée également avec cette aggravation que la végétation freine peu l'écoulement s'il s'agit de rizières et que ces fonds de vallée deviennent rigoureusement imperméables dans certaines périodes de la FSP, donc le bassin devrait être classé en RI fort soit $\overline{\text{RI}}$.

Nous avons visité, rapidement parfois, peut être 30 à 40 % des 130 bassins étudiés en régions tropicales sèches mais, dans bien des cas, ces visites ne suffisent pas et il faudrait de bonnes cartes pédologiques utilisables par l'hydrologue. Elles n'existent que pour un assez petit nombre de bassins.

Dans ces conditions nous pouvons classer un bassin dans une catégorie I ou RI, mais pour les sous-catégories, il faut des données pédologiques suffisantes ou alors trouver des cas très simples comme certains bassins très perméables de la Casamance.

Pour le cas contraire, nous n'avons pas donné de subdivision c'est ainsi que la Koba M3 est classée en RI.

5.2. LA SURFACE

Elle intervient mais, même pour ce facteur, on rencontre quelques difficultés, certains bassins pouvant avoir des limites imprécises.

5.3. LA PENTE

Celle-ci est représentée par l'indice de pente global I_g (DUBREUIL, 1965). Mais si l'on considère des bassins de surfaces croissantes avec I_g constant, cela signifie que dans la plupart des cas la pente des têtes de bassin est d'autant plus forte que le bassin est plus grand et que la pente du secteur aval est plus faible, et comme il n'y a que très peu de montagnes il est bien difficile de trouver des bassins de 1 000 km² avec I_g supérieur à 10 m.km⁻¹.

Enfin signalons que pour tenir compte des pentes transversales nous avons utilisé quelquefois un I_g corrigé, comme dans le cas du Sahel.

5.4. LA COUVERTURE VÉGÉTALE

Elle peut être quantifiée tant bien que mal, CADIER (1991) l'a fait au Nordeste du Brésil. Dans notre cas, le fait de considérer tous les bassins en FSP simplifie un peu la question. Une couverture végétale dense freine l'écoulement mais, comme on l'a vu plus haut, l'existence de rizières augmente le coefficient de ruissellement.

5.5. ACTIVITÉS HUMAINES ET AMÉNAGEMENT

Les activités de l'homme peuvent modifier sérieusement la valeur du coefficient de ruissellement. Nous venons de faire allusion à l'influence des rizières, la mise en culture avec des mesures efficaces pour la conservation de l'eau et du sol réduisent sérieusement Kr 100 mm. Pour Mogodé A (Cameroun), nous n'avons malheureusement pas pu effectuer une estimation correcte de Kr 10 ; les observations ont seulement montré que les mesures prises avaient réduit très sérieusement Kr 100 mm qui est peut-être de l'ordre de 10 % alors que Kr 100 mm sur Mogodé B, C3, le bassin témoin est égal à 30 %.

À l'inverse, l'urbanisation accroît généralement Kr : la valeur de Kr 100 du bassin du Moro Naba Bu 4 (Burkina Faso) qui était de 43 % en 1960 doit être nettement supérieure maintenant.

Enfin, les barrages réservoirs modifient Kr 100 mm surtout lorsque le réservoir est plein ; il constitue alors une surface imperméable pour laquelle Kr 100 mm = 100 %, alors que dans l'état naturel pour la zone inondée Kr 100 mm était beaucoup plus faible. Dans quelle mesure ? Dans certains cas, c'est très difficile de le dire et c'est pourquoi nous avons renoncé à analyser Kr 100 mm pour les bassins de Djilakoum (Sénégal) et de la Sessé à Karassasso (Burkina Faso). Nous avons rencontré de sérieuses difficultés pour Kambo aval M 10 (Mali) et sur d'autres bassins pourvus de réservoirs. Bien entendu, on ne peut étudier ces influences que cas par cas.

6. VARIATIONS DE Kr 100 mm AVEC LA SUPERFICIE, L'INDICE DE PERMÉABILITÉ, ET L'INDICE GLOBAL DE PENTE I_g

Nous avons reporté sur un graphique semi-logarithmique les valeurs de Kr 100 mm pour les 130 bassins dont nous avons revu les données en marquant chaque point par le n° du bassin, l'indice de perméabilité et l'indice de pente global, et nous avons cherché à mettre au point les courbes moyennes représentant KR 100 mm en fonction de S pour chaque indice de perméabilité et pour 3 valeurs de I_g pour chaque valeur du premier indice : $I_g = 15$ m.km⁻¹, $I_g = 7$ m.km⁻¹ et $I_g = 3$ m.km⁻¹, valeurs pour lesquelles nous disposons d'un nombre de points suffisants.

Auparavant nous avons reporté 3 points correspondant à des conditions de perméabilité bien connues :

- Mouda II (Cameroun) reconstitué pour 1 km² : sol d'érosion typique particulièrement imperméable, PI ;
- le Mayo Ligan Tc1 (Tchad), sols halomorphes imperméables que nous avons classé en \underline{PI} équivalent à \underline{I} ;
- le bassin de la Comba II (Congo), aussi imperméable que Mouda II ; il n'a exigé aucune reconstitution et nous avons une excellente carte pédologique.

Les deux premiers sont à la limite nord du régime tropical sec, le dernier en zone tropicale humide. Nous connaissons d'autres régions d'étendue limitée aussi imperméables en zone tropicale sèche, mais elles n'ont pas été pourvus de bassins représentatifs.

On devine une courbe décroissante, limite supérieure de Kr 100 mm.

Nous avons commencé par tracer la courbe I Ig 7 avec quelques points sûrs dont Mouda I C4 (Cameroun), puis les deux courbes I Ig 15 et I Ig 3 dont la position est un peu moins sûre. Le tracé de la courbe RI Ig 7 a été plus délicat malgré un grand nombre de points. Ceux de RI Ig 15 et RI Ig 3 n'ont pas été très faciles.

Dans les deux cas, le tracé est gêné par une dispersion notable due aux facteurs de Kr autres que S, P et I et aussi aux difficultés d'affecter un indice de perméabilité précis à un bon nombre de bassins. Nous donnerons en annexe 2 (p. 159) quelques informations concernant les points aberrants.

Pour les bassins perméables, l'influence de Ig n'est pas très nette ; nous n'avons tracé qu'une courbe moyenne correspondant à Ig 7.

Pour les bassins très perméables TP c'est encore pire, l'influence de S est loin d'être évidente : en fait, nous avons 4 ensembles, celui de la Casamance, les bassins de Niéna Dionkélé (Burkina Faso), ceux de Sanguéré (près de Garoua, Cameroun) et ceux de Badé (sables de Kélo, Tchad). Seul le dernier montre clairement que Kr 100 mm varie avec S mais la courbe est *croissante* de l'amont vers l'aval et cela s'explique ainsi : des résurgences apparaissent, la largeur des bas-fonds humides s'accroît de sorte que même si on élimine l'augmentation directe du débit de base provenant des restitutions, l'augmentation relative de la superficie de la zone humide, seule zone contributrice pour une pluie journalière ponctuelle de 100 mm, conduit à un volume de ruissellement qui croît légèrement plus vite que la superficie du bassin lorsque celle-ci augmente. Et il s'agit bien de ruissellement, l'examen des temps de base le prouve (RODIER, 1989).

L'ensemble de Sanguéré (Cameroun), malgré une très bonne carte pédologique, ne peut pas fournir d'indication valable, le plus grand des bassins S VII C13 est trop petit : 86 km² et il est trop hétérogène dans sa perméabilité.

Pour la plaine de Niéna Dionkélé les données pédologiques sont insuffisantes pour juger de l'homogénéité relative, si elle existe, des conditions de perméabilités. Pour la Casamance les bassins sont nombreux, mais il n'existe pas une suite de bassins allant de 5 km² à 300 km² comme à Badé et, en plus, les cours d'eau rencontrent la zone d'influence maritime avant de prendre de l'importance. Mais pour ces deux derniers bassins tout ce que l'on peut dire, c'est qu'il n'y a aucun indice de décroissance de Kr 100 mm quant S croît, au contraire.

En première approximation pour ces deux bassins très perméables, on ne doit pas se fier aux valeurs S et de Ig pour déterminer précisément Kr 100 mm. *A priori*, il est inférieur à 5 à 7 % et on peut en avoir une idée au moins en Casamance en ayant recours à la méthode des unités de paysages citée plus haut. Elle peut être appliquée ailleurs mais il faut un minimum de mesures d'infiltrabilité sur le terrain.

Sur la figure 2 (p. 152) nous avons reporté les courbes de Kr 100 mm et 38 points représentatifs : soit des valeurs sûres, soit des points aberrants. Nous avons évité, autant que possible, de présenter des points tels que RI30 pour lequel la croissance de l'infiltrabilité est compensée par la croissance de la pente, de sorte que le point ne devrait pas être loin de la courbe Ig7 RI, mais il est difficile de connaître l'écart. De tels points ne donnent qu'une simple indication qui peut être utile lorsqu'il y a au moins 5 ou 10 points de ce genre, voisins de la même courbe.

Le diagramme avec 130 points existe mais il est très peu lisible et le traitement à l'ordinateur ne donnerait pas grand chose, car pour un bon nombre de cas il faut tenir compte d'éléments de jugement, sûrs mais non chiffrés.

On peut consulter l'annexe 2 (p. 159) où sont expliquées les raisons des écarts des points aberrants par rapport à la courbe.

Ils correspondent :

- à des valeurs fortes ou faibles des facteurs autres que S, P et Ig ;
- à des parties de bassins à forte pente mais très perméables d'où des valeurs élevées de Ig sans signification pratique (voir le paragraphe 5 Perméabilité) ;
- à un classement incertain de l'infiltrabilité par suite du manque d'information pédologique.

L'utilisation d'un questionnaire s'impose pour éviter dans les applications des erreurs très importantes.

7. FORMULES DONNANT Kr 100 mm EN FONCTION DE S

Il a été facile d'ajuster aux courbes expérimentales des branches d'hyperboles. Pour les mêmes indices de perméabilité et de pente, l'asymptote est au-dessus de celle du Sahel car la dégradation hydrographique est plus faible et souvent inexistante, les pertes par évaporation sont moins élevées (averses plus rapprochées). Au contraire, pour S = 2 km² les valeurs de Kr 100 mm sont nettement plus faibles qu'au Sahel pour les bassins imperméables, il y a là l'influence de la couverture végétale. Pour les bassins relativement imperméables et perméables la différence n'est pas significative.

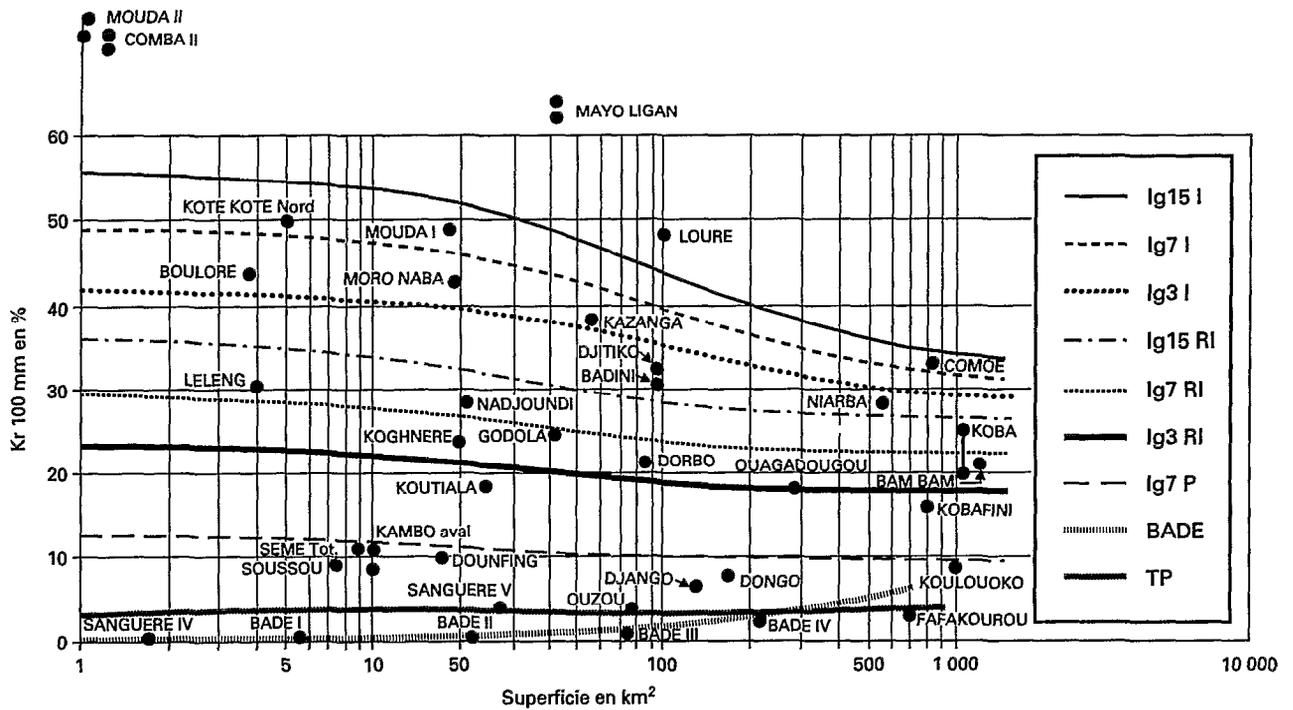


FIG. 2. — Coefficient de ruissellement K_r 100 mm en zone tropicale sèche en fonction de la superficie, de l'indice de pente et de la perméabilité.

Les formules sont les suivantes :

— bassins imperméables I (anciens P2)

$$Ig\ 15 \quad K_r\ 100\ mm = \frac{2400}{S + 100} + 32 \text{ en \%}$$

$$Ig\ 7 \quad K_r\ 100\ mm = \frac{1940}{S + 100} + 30$$

(Sahel)

$$K_r\ 100\ mm = \frac{1476}{S + 37} + 22$$

— bassins relativement imperméables RI (anciens P3)

$$Ig\ 15 \quad K_r\ 100\ mm = \frac{325}{S + 30} + 26$$

$$Ig\ 7 \quad K_r\ 100\ mm = \frac{240}{S + 30} + 22$$

$$Ig\ 3 \quad K_r\ 100\ mm = \frac{200}{S + 30} + 17$$

— bassins perméables P (anciens P4)

$$Ig\ 7 \quad K_r\ 100\ mm = \frac{55}{S + 17} + 9,5$$

- bassins très perméables Valeur médiane 3 %
(anciens P5) Kr 100 mm entre 0,4 et 7 %
- bassins TP type Badé Kr 100 mm = 0,16 S^{0,55}

8. VARIATIONS DU COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT DÉCENNAL Kr 10

Les facteurs sont les mêmes mais la hauteur de pluie standard varie d'un bassin à l'autre ; en outre Pp 10 n'a qu'une relation très lâche avec P annuelle. En Casamance, l'influence littorale conduit à des valeurs de Pp 10 atteignant 140 à 150 mm avec des durées nettement plus longues. Pour simplifier nous avons gardé le schéma de hyéto-gramme standard conduisant à Kr un peu plus élevé.

En altitude, surtout pour la Daye To12 (Togo), nous avons pris des valeurs de Pp 10 plus faibles qu'en plaine comparables à celle du plateau de l'Adamaoua (Cameroun).

Souvent, heureusement, Pp 10 est très voisin de 100 mm de sorte que les courbes Kr 10 = f(S), qui n'auraient en toute rigueur pas de signification (puisque Pp varie), en ont une.

Pour faciliter le tracé des courbes, nous avons étudié les rapports k de Kr 10/Kr 100 mm pour les différents indices de perméabilité sans perdre de vue les valeurs de Pp 10.

Nous avons abouti aux conclusions suivantes :

- bassins imperméables k varie de 0,98 à 1,10 médiane 1,01, valeur adoptée 1,02 ;
- bassins relativement imperméable k varie de 0,92 à 1,10 médiane 1,02, valeur adoptée 1,02 ;
- bassins perméables k varie de 1 à 1,20 médiane 1,05, valeur adoptée 1,05 ;

Le Brusq a été éliminé P annuelle (1 550 mm) ;

- bassins très perméables k varie de 1 à 1,30 médiane 1,05 valeur adoptée 1,10.

Dans les deux dernières catégories surtout, il y a des bassins pour lesquels P annuelle dépasse nettement 1 200 mm, nous avons conservé ces points (cas du Sénégal). Dans ces deux dernières catégories, les valeurs du rapport k pourraient être influencées par les bassins sénégalais mais on trouve ailleurs d'autres valeurs fortes du rapport k pour P annuelle inférieure à 1 200 mm.

Il est à noter que, sauf pour les bassins très perméables, un bon nombre de valeurs correspond à la médiane, de sorte que les valeurs du rapport k généralement surestimées pour les stations des réseaux sont sans importance.

Pour les bassins imperméables, l'échantillon comporte trop de bassins avec P annuelle inférieure à 1 000 mm ; c'est pourquoi nous avons adopté le coefficient 1,02 au lieu de 1,01.

Compte tenu de ces majorations, on a établi les formules suivantes de Kr 10 :

$$\text{Ig 15} \quad \text{Kr 10} = \frac{2\,480}{S + 100} + 32,7$$

- bassins imperméables I
(anciens P2)

$$\text{Ig 7} \quad \text{Kr 10} = \frac{2\,000}{S + 100} + 30,5$$

$$\text{Ig 3} \quad \text{Kr 10} = \frac{1\,470}{S + 100} + 28,6$$

- bassins relativement
imperméables RI
(anciens P3)

$$\text{Ig 15} \quad \text{Kr 10} = \frac{332}{S + 30} + 26,6$$

$$\text{Ig 7} \quad \text{Kr 10} = \frac{245}{S + 30} + 22,5$$

$$\text{Ig 3} \quad \text{Kr 10} = \frac{205}{S + 30} + 17,4$$

- bassins perméables P
(anciens P4)

$$\text{Ig 7} \quad \text{Kr 10} = \frac{58}{S + 17} + 10$$

- bassins très perméables TP valeur médiane Kr 10 = 3,5 %
- bassins de Badé Kr 10 = 0,165 S^{0,55}

9. VARIATIONS DE Kr 70 mm AVEC LA SUPERFICIE, LA PENTE ET L'INDICE DE PERMÉABILITÉ

Pour les régions tropicales sèches, les variations de Kr 70 mm avec S sont beaucoup moins intéressantes que pour le Sahel mais les courbes peuvent faciliter l'extrapolation des données de Kr 100 mm pour les hauteurs de précipitations ponctuelles supérieures à 100 mm.

Les courbes ont été mises au point exactement comme les courbes concernant Kr 100 mm.

Nous avons abouti aux équations suivantes :

	Ig 15	$Kr\ 70\ mm = \frac{2\ 000}{S + 100} + 29,5$
— bassins imperméables I (anciens P2)	Ig 7	$Kr\ 70\ mm = \frac{1\ 620}{S + 100} + 27,5$
	Ig 3	$Kr\ 70\ mm = \frac{1\ 250}{S + 100} + 25$
	Ig 15	$Kr\ 70\ mm = \frac{250}{S + 20} + 21,7$
— bassins relativement imperméables RI (anciens P3)	Ig 7	$Kr\ 70\ mm = \frac{200}{S + 20} + 18,5$
	Ig 3	$Kr\ 70\ mm = \frac{150}{S + 20} + 15$
— bassins perméables P (anciens P4)	Ig 7	$Kr\ 70\ mm = \frac{50}{S + 15} + 8$

Pour les bassins très perméables la valeur médiane de Kr est voisine de 2 %

10. CONCLUSION

Ce travail avait pour objet la remise à jour d'une étude analogue ancienne (RODIER et AUVRAY, 1965). En reprenant les indices actuels, nous avons comparé les valeurs de Kr 10 estimées en 1965 et en 1993 pour $S = 10\ km^2$ et $S = 100\ km^2$ (cf. tableau II).

Normalement on devrait trouver en 1993 des valeurs plus faibles puisque l'écoulement retardé a été éliminé beaucoup plus rigoureusement qu'en 1965.

En outre, quelques surestimations notoires pour des raisons de sécurité devraient jouer dans le même sens.

En fait, pour les bassins imperméables, assez bien connus en 1965, l'écart est sensible mais faible.

Pour les bassins relativement imperméables, il est beaucoup plus important, de 20 à 30 %, davantage pour les bassins perméables. L'écart dû à l'écoulement retardé serait de l'ordre de 15 % en moyenne. On connaissait mal ces bassins, le nombre de points représentatifs étaient insuffisants et on prenait des marges de sécurité même pour le tracé des courbes ; elles passaient nettement au-dessus de points représentatifs par lesquels elles passent maintenant. En outre nous avions bien vu que ces courbes plongeaient de façon assez modeste quand S croît, mais en fait, elles plongeaient plus vite qu'on ne le pensait.

Il faut dire enfin que la prise en compte des bassins tropicaux humides pouvait conduire à de plus fortes valeurs de Kr (saturation plus facilement atteinte).

Pour les bassins perméables on ne savait pas grand chose et ceci montre que notre révision n'était pas superflue.

Ces baisses de Kr 10 seront compensées en partie, pour le calcul du débit de point décennal, par la diminution du temps de base.

TABLEAU II. — Estimation des Kr 10 en 1965 puis en 1993

Indice infiltrabilité	Indice global de pente	Date de l'étude	KR 10 en %	KR 10 en %
			10 km ²	100 km ²
I	lg 15	1965	62,8	49
		1993	55,2	45,1
I	lg 7	1965	51	41
		1993	48,7	40,5
RI	lg 15	1965	42,8	39,5
		1993	34,9	29,1
RI	lg 7	1965	38,5	35
		1993	28,6	24,4
RI	lg 3	1965	32,5	30,05
		1993	22,5	19
P	lg 7	1965	19	18,5
		1993	12	10,5

On ne doit pas garder trop d'illusions sur la précision des résultats qu'on doit attendre de ces courbes dans les applications pratiques. Bien sûr, on doit faire un travail aussi sérieux que possible mais les exemples de points aberrants présentés dans l'annexe 2 montrent bien qu'il est malaisé de classer un bassin dans un sous-groupe de perméabilité \bar{I} ou \underline{RI} ou \bar{P} par exemple et que le réseau de courbes néglige un bon nombre de facteurs, ce qui conduit à une *dispersion notable* d'où deux conclusions pratiques :

1 — faire obligatoirement une visite sérieuse du bassin à étudier avec étude de l'infiltrabilité des sols, et même si possible mesures au mini-simulateur et examen du chevelu hydrographique.

2 — Utiliser lors de l'étude un questionnaire ou *check list* qui prendra en compte les facteurs « secondaires ». Nous allons compléter le premier *check list* mis au point pour le Sahel, il peut rendre service pour les régions tropicales sèches ; en attendant ces deux précautions sont valables quelle que soit la méthodologie de calcul utilisée.

Toutes ces données ainsi que celles du Sahel concernant non seulement les coefficients de ruissellement mais les temps de base, le temps caractéristique de base, etc. ont été utilisées par l'Orstom et le CIEH pour la mise au point du manuel pour la prédétermination des crues de fréquence décennale dans les régions sahéniennes et tropicales sèches (1993). La responsabilité de la composante Orstom est assumée par J.F. Nouvelot qui pour la présente étude nous a prodigué ses conseils et une aide particulièrement efficace. Nous lui en sommes très reconnaissants.

BIBLIOGRAPHIE

- ALBERGEL (J.), DA COSTA (H.) et PÉPIN (Y.), 1992 — *Régionalisation des paramètres hydrologiques à prendre en considération pour l'aménagement d'un bas-fond rizicole dans l'estuaire de la Casamance (Sénégal)*, 8^e Journées hydrologiques de Montpellier, Montpellier, Orstom.
- ALBERGEL (J.), LAMACHÈRE (J. M.), LIDON (B.), MOKADEM (A.) et VAN DRIEL (W.) 1993 — *Mise en valeur agricole des bas fonds au Sahel. Typologie fonctionnement hydrologique, potentialités agricoles*, rapport final d'un projet Coraf. R3S, Ouagadougou, CIEH.

- CADIER (E.) 1991 — *Hydrologie des petits bassins du Nord-est brésilien semi-aride*, thèse université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, multigr.
- CASENAVE (A.) et VALENTIN (Ch.) 1989 — *Les états de surface de la zone sahélienne — Influence sur l'infiltration*. Paris, Orstom coll. Didactiques.
- CHEVALLIER (P.), CLAUDE (J.), POUYAUD (B.) et BERNARD (A.) 1985 — *Pluies et crues au Sahel — hydrologie de la mare d'Oursi (1976-1980)* Paris, Orstom, coll. Travaux et documents, n° 190.
- CHEVALLIER (P.) 1988 — *Complexité hydrologique du petit bassin versant — Exemple en savane humide Booro Borotou (Côte d'Ivoire)*, thèse, université des Sciences et techniques du Languedoc, Montpellier, multigr.
- DUBREUIL (P.) 1965 — Contribution à l'étude d'implantation de bassins représentatifs et expérimentaux. *Publ. AISH*, n° 66 : 54-63.
- DUBREUIL (P.), CHAPERON (P.), GUISCAFRE (J.) et HERBAUD (J.) 1972 — *Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux de l'Orstom*. Année 1951-1969, Paris, Orstom.
- LE BARBE (L.) 1982 — Étude du ruissellement urbain à Ouagadougou. Essai d'interprétation théorique, *Cah. Orstom, sér. Hydrol.*, vol. XIX n° 3 : 135-204.
- NOUVELOT (J.F.) 1993 — *Manuel pour le calcul des crues et apports des petits bassins versants ruraux d'Afrique sahélienne et tropicale sèche*, à paraître.
- RODIER (J.A.), AUVRAY (C.) 1965 — *Estimation des débits de crues décennales pour les petits bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique Occidentale*, Paris, CIEH-Orstom.
- RODIER (J.A.) 1986 — Caractéristiques des crues des petits bassins versants représentatifs au Sahel. *Cah. Orstom, ser. Hydrol.* vol. XXI (2).
- RODIER (J.A.) 1989 — Écoulement de surface dans les bassins perméables du sahel — Comparaison avec d'autres bassins perméables tropicaux. *Hydrol. cont.*, vol. 4, (2) : 123-138.
- RODIER (J.A.) 1992 — *Du simulateur de pluies aux bassins représentatifs sahéliens*, Paris, Orstom, coll. Études et thèses.
- RODIER (J.A.) 1994 — *Paramètres caractéristiques des fortes crues au Sahel*, à paraître.
- VUILLAUME (G.) 1974 — L'abattement des précipitations journalières en Afrique intertropicale. Variabilité et précision de calcul. *Cah. Orstom, sér. Hydrol.*, vol. XI (3) : 205-240.

Annexe 1

PARAMÈTRES CARACTÉRISTIQUES DES CRUES EN RÉGIONS TROPICALES SÈCHES

Pour 38 bassins sélectionnés parmi les 130 étudiés

SÉNÉGAL

Bassin Pan. mm	s km ²	Ig m/km	Tm mn	Tb mn	Qmaxr/ Qr Tc mn	Kr 70 mm %	Kr (%) 100 mm Kr10	Pp10 Pm10 mm	Qmax10 m ³ .s ⁻¹	Ind. perm
Songrourou Diango Pan 1 330 S7 - 1966	135	1,5-2	1 440-1 800	3 000-3 600		6-7	7 8,8	165 142	13-15	P(2)
Casamance Fafakourou Pan 1 235 S10 - 1975	700	0,8-1,2		((5 800))	Tc : 2 170		Kr10 : ((3,5))	138 94	15-20	TP (3)

MALI

Dounfing M1 Pan 1 070 - 1954	17,5	25	20-25	260	2,6-2,7 100	8	10 10,47	107 91,5	35-40	P
Djitiko à Madina M2 Pan 1 150 - 1960	92,3	4,6	900	2 800-3 200	2,3-2,5 1 350-1 600	30	33 33,7	113 87	40-45	RI
Koba à Déguela M3 Pan 1 150 1960	1 052	(5) (1)	3 000-3 600 (4)	9 000 (4)	5 200	19-21 (4)	20-25 24 (4)	113 75,7	80-110 (4)	RI
Kobafini à Loulouni M8 Pan 1 250 - 1959	800	5-6	600-660	2 000-2 300	3,3	13	16 17	125 85,3	310	P
Kambo aval M10 Pan 1 250 - 1990	10	2,84	?	600-900	2,2-2,5 ? 480-540	(18)	(19) (20,3)	123 108	9-10 (5)	P
Seme I tot. M12 Pan 1 050 - 1991	9,05	63	?	180 ?	?	((10))	((11)) ((11))	107 94	25-35 (6)	P

BURKINA FASO

Boulsa trop. sec Koghneré Bu1 Pan 690 - 1960	19,8	4,3	350	750 (7)	2,6 300	22 (7)	24 23,5 (7)	95,4 79	21	RI
Koulouoko Bu3 Pan 690 - 1960	1 010	1,5 2	1 450	5 750	3,5 2 000-4 000		9 9	95,4 56,3	70	RI
Ouagadougou Moro Naba FSP Bu4 Pan 850 - 1962	19,1	7,1	200	780	2,6-2,8 415	40	43 42,3	96 81	39	I
Ouagadougou I FSP Bu6 Pan 850 - 1962	294	3	480	2 900	2,57 1 560	15,8	17,4	96 69,5	95 (8)	RI
Parlapoko à Kazanga Bu5 Pan 920 1965-1983	54,8	4,8	60 80	420 450	2,8-3,2 (200)	33	38,5 38,6	101 79	175	I
Louré Bu7 Pan 920 - 1965	98	4,2	450-480	1 300	(3,5)	43,5	48,5 48,8	101 76,3	160 180	I
Guilla à Niarba Bu8 Pan 920 - 1965	572	2,5	950-1 100	3 200-3 600	(2,8-3) 1 400	25	28 28,2	101 67	180 220	I
Comoé à Karfiguela Bu9 Pan 1 200 1953-1980	812	(3)		2 000-3 000	Tc 2 700-2 900		33 34,4	118 80,2	150 160	I

Ouzou à Koueredeni FSP Bu24 Pan 1 065 1974-1976	75,6	19-20 (1)	600	2 400-3 000	2,4-2,8 1 250-1 350	3,6	4 4,12	106 82,5	4	TP
Dougo à Dingasso FSP Bu28 Pan 1 065 1974-1982	158	8	480	1 980	2,3-2,5 920-1 350	7,7	7,8 7,78	106 78,4	19,5	\overline{TP}
Leraba orient Badini amont FSP Bu32 Pan 1 250 1980-1981	90,8	13-14	180	840	2-2,3	29	31 32	123 96,6	110-130	\overline{RI}

TOGO

Nioufouko à Nadjoundi Pan 1 050 FSP To6 1963	21,2	8,8	60	240-250	2,7-3 105-110	26	29 29,3	111 93,8	110-115	RI
--	------	-----	----	---------	------------------	----	------------	-------------	---------	----

BÉNIN

Soussou Be3 Pan 1 100 - 1957	7,4	(60)	140-180	550-600	(2,7)	8,5	9 9	123 111,3	6,5	\underline{P}
---------------------------------	-----	------	---------	---------	-------	-----	--------	--------------	-----	-----------------

NIGER

Dallol Maouri Bangou Beri Ni3 Pan 840 - 1969	12,5	14	60-70	140-150	2,5-2,6 65-70	14	17,5 17,9	103 89	50	\overline{RI}
Bangou Beri Secondaire Ni4 Pan 840 - 1969	0,5	25-30	20-25	60-80	3 ?	32	40 40,6	103 101	13	I
Kote Kote Nord DSP Ni6 Pan 840 - 1969	5	(15-20)		180-220	3 ?	45	50 50-55	103 94	70-100	I

CAMEROUN

Bouloré FSP C1 Pan 820 - 1955	3,75	58	10	50	2,3 41-48	41	44,5 45,1	105 97	62	\overline{I}
Godola Leleng S4 FSP C3 Pan 820 - 1969	4	45	10-15	55-60	2,3-2,4 33-40	21,4	31,3 33	105 97	53	RI
Mortosolo à Godola FSP C4 Pan 820 1969	42	15,3	45-50	120-140	2,1 100-110	19	24,3 25,2	105 84,8	205	\overline{RI}
Mouda I FSP C6 Pan 1 000 1985	18,1	11,6 (1)	100-110	260-280	2,3 125	43	49,6 49,8	105 90,3	100	I
Mouda II FSP C7 Pan 1 000 - 1985	(1) (9)	31				73	74 74	105 105		PI
Sanguere IV FSP C12 Pan 1 035 1975	1,66	24					Kr10 0,6-0,8	118 118	0,3-0,5	\underline{TP}
Sanguere V FSP C13 Pan 1 035 1975	27,1	8	330-360	630-750	2,1-2,3 350-385	2	3,7 4,57	118 98	8,5 (5)	TP

TCHAD

Mayo Ligan Tcl Pan 900 1965 FSP	41	13 (1)	120-140	300-340	2,2 180-120	50	62,5 64,2	110 88	280	\overline{I}
Bade Bade I Manda Tc2 Pan 1 220 - 1964 FSP	5,36	8,7	40-80	300	2,3	0,3	0,4 0,4	110 101	0,3	\underline{TP}
Bade II Mangourou TC3 Pan 1 220 - 1964 FSP	21,9	7,3	300	600	2,1	0,64	0,66 0,68	110 91,3	1	\underline{TP}

Bade III Kano Tc4 Pan 1 220 - 1964 FSP	72	3,4	480	2 880	3,6	1,7	1,8 1,8	110 83,6	3	<u>TP</u>
Bade IV Bah Tc5 Pan 1 220 1964 FSP	316	2,7		7 200-8 500	2,5 ?	3,3	3,7 3,9	110 77	8-10	<u>TP</u>
Bam Bam à Tialo Zoudou Tc14 Pan 835 1966 FSP	1 200	3,4	900-1 020	1 620-1 740	1,6 1 440	19	21 20,8	100 60,5	260	<u>RI</u>
Mayo Dorbo à Balani Tc18 Pan 990 1967 FSP	1 180	4		5 760-7 200			Kr10 9-13	110 169	100-130	<u>P</u>

- (1) Ig corrigé.
- (2) Rizières ou dépressions inondables.
- (3) Peu peuplé, peu cultivé.
- (4) Centrage de la pluie vers l'aval.
- (5) Après essai d'élimination de l'influence du réservoir.
- (6) Crue bassin réduit aval.
- (7) Nous avons conservé Tb et Kr établis à partir de l'averse du 18-08-1962 vers le milieu de la saison des pluies.
- (8) Qmax 10 (débit maximum décennal) est calculé sur la partie aval du bassin, la colonne précédente correspond au bassin global.
- (9) Reconstitué pour 1 km², en réalité S = 0,003 km².
- (10) Qmax10 DSP peut être équivalent ou légèrement supérieur.

ANNEXE 2

JUSTIFICATION DE LA POSITION DES POINTS ABERRANTS DE LA FIGURE 2.
COURBES DE VARIATIONS DE Kr 100 mm EN FONCTION DE S.

Nous avons passé systématiquement en revue les caractéristiques des bassins (dans la mesure où nous les connaissons) pour tous les points s'écartant significativement des courbes qui leur correspondent. Nous donnons ici quelques exemples caractéristiques.

BASSINS IMPERMÉABLES

— Bu17, Louré (trop fort). Il y a un réservoir à l'aval qui ne facilite pas l'analyse, donc la valeur de Kr n'est pas connue avec précision. Il est difficile de bien classer ce bassin faute de carte pédologique ; ce dont on est sûr, c'est qu'il est nettement plus imperméable que Kazanga, Bu15, et qu'en 1964 il était déjà très peuplé et très cultivé ; rien que cette circonstance justifie une valeur de Kr au-dessus de la moyenne.

— Bu19, Comoé à Karfiguéla (un peu fort). Comme pour toute station du réseau, la précision de la détermination de Kr 100 mm laisse à désirer et il n'y a pas de carte pédologique.

— Ni4, (Niger) Bangou Beri secondaire (trop faible). Le plateau perméable du continental terminal occupe une part notable du bassin, on ne peut pas préciser l'indice de perméabilité : I correspond probablement à une valeur minimale de l'infiltrabilité globale, peut-être I serait plus approprié. À titre indicatif le bassin principal Ni3 contigu, où les plateaux couvrent une proportion beaucoup plus importante du bassin, doit être classé en RI.

BASSINS RELATIVEMENT PERMÉABLES

— M2RI Djitiko (trop fort). Là, les volumes ruisselés sont bien déterminés, mais il y a un problème de surface. Le bassin amont très perméable comprend une zone endoréique ; faut-il la compter ou non ? Là aussi les données pédologiques sont fragmentaires et la classification RI ne peut être précisée RI ou $\overline{\text{RI}}$? Cela tient à l'importance des sols peu perméables ou se saturant rapidement à l'aval du bassin, et à l'importance des surfaces cultivées en riz.

— M3RI Koba (Mali). Kr 100 mm est incertain, sa valeur est liée à la lame ruisselée, Hr, de la très forte averse du 21-09-60 très difficile à séparer des lames ruisselées des trois averses suivantes. Une bonne carte pédologique des fonds de vallée améliorerait la classification.

— Bu3 $\overline{\text{RI}}$ Baldini (Burkina Faso). Sans carte pédologique suffisante, la classification en RI est hasardeuse.

— C4 Godola (Cameroun). Pour le bassin qui comprend le bassin C3 (Leleng), nous ne disposons pas de carte pédologique, il a été classé en RI comme le bassin C3. On ne peut pas avec certitude aller plus loin, mais il est très vraisemblable qu'il doit être un peu plus perméable : RI ?

— C3 Leleng (Cameroun). Ig = 45 ne doit pas faire illusion, les plus fortes pentes à l'amont sont constituées par des amas de blocs perméables. La pente de la zone active est nettement plus faible.

— Bu3 Koulouoko (trop faible). On ne doit pas perdre de vue que ce bassin (P annuelle = 690 mm) est au Sahel, et sur la moitié de la longueur du cours d'eau la pente est très faible, le lit encombré de végétation, conditions idéales pour l'évaporation, d'où Kr 100 mm très faible, (une bonne partie de l'écoulement rapide est transformé en écoulement lent).

— Bam Bam Tc14 (Tchad), au contraire, présente certes des pertes dans les lits majeurs, mais il a un lit d'Oued plus ou moins torrentiel ; en définitive, les pertes par évaporation sont beaucoup plus faibles que pour Bu3 et la part d'écoulement rapide transformée en écoulement lent doit être très limitée (restitution des lits majeurs).

BASSINS PERMÉABLES

— M10 (Mali) Kambo aval (trop fort). La surface du réservoir et ses abords humides ruissellent bien, ainsi que les rizières du bas-fond, ce qui majore Kr 100 mm par rapport à ce que donnerait l'infiltrabilité des sols naturels.

— M16 (Mali) Koutiala (trop fort). Grès friables perméables mais il est très peuplé, très cultivé d'où Kr 100 mm trop élevé.

— M8 Kobafini à Loulouni (Mali) (trop fort). La courbe Hr = f(Pm) a été influencée par l'averse exceptionnelle du 20-08-59, Pm = 103 mm.

— M12 (Mali) Sémé I total Ig = 63 n'a pas de signification, le chiffre 63 est dû à la partie amont accidentée du bassin qui, les hydrogrammes le prouvent, n'apporte presque pas de ruissellement, ce qui est souvent classique dans ces bassins gréseux.

— B3 Soussou (Mali) Ig = 60. Même remarque, mais c'est dans le granite.

BASSINS TRÈS PERMÉABLES

— Bu28 (Burkina Faso) Doungo Kr 100 mm est un peu fort, mais sans carte pédologique suffisante il est difficile de préciser s'il s'agit de $\overline{\text{TP}}$ ou $\overline{\overline{\text{TP}}}$.

— C12 Sanguéré IV (Cameroun) (trop faible). La dégradation s'ajoute à l'infiltrabilité.

De façon générale les bassins très perméables, très peuplés et très cultivés, surtout en riz, conduisent à des valeurs de Kr 100 mm supérieures à la médiane qui est voisine de 3 %.