

Evaluation de l'écoulement annuel dans les régions tropicales sèches d'Afrique occidentale *

J. A. RODIER

Chef du Service Hydrologique de l'ORSTOM
Conseiller Scientifique à ÉLECTRICITÉ DE FRANCE

RÉSUMÉ

Cette étude a pour objet de mettre à la disposition des ingénieurs qui ont à aménager des réservoirs, quelques éléments pour leur permettre d'évaluer les volumes annuels dont ils pourront disposer pour diverses fréquences dans les régions tropicales sèches (précipitations annuelles comprises entre 750 et 1000 mm).

Cet article fait suite à une publication de la collection « Travaux et Documents de l'ORSTOM » : Évaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel tropical africain. La méthodologie reste la même, et on a reproduit toutes les données de base utilisées :

— *On a procédé à une étude statistique des précipitations annuelles, les résultats sont présentés sous la forme d'une esquisse cartographique et de courbes définissant la distribution statistique temporelle des précipitations annuelles.*

— *On a considéré trois catégories de bassins :*

- *ceux de superficie inférieure à 100 km²,*
- *ceux de superficie comprise entre 100 et 1 000 km²,*
- *ceux de superficie dépassant 1 000 km².*

Dans chaque catégorie on a classé les bassins par grands types physiogéographiques suivant la nature du sol et du sous-sol. Pour chaque catégorie on considère un bassin-type : bassin représentatif ou bassin contrôlé par une station du réseau. Dans le premier cas, on a utilisé parfois des modèles d'écoulement pour reconstituer à partir des précipitations de longues séries d'écoulement annuel. On en a déduit des courbes de distribution caractéristiques de la fréquence décennale sèche à la fréquence décennale humide.

Cette étude met en évidence un certain nombre de lacunes dans nos connaissances sur cette bande climatique.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to give to civil engineers, who have to build dams, necessary informations for the computation of annual available volumes behind the dams for various frequencies in tropical dry areas (annual precipitation depth between 750 and 1000 mm).

This paper follows a publication of the "Travaux et Documents de l'ORSTOM" : Evaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel tropical africain. The methodology remains the same and as has been made for the Sahel, all the rough data used for the computations have been given in this text.

— *A statistical analysis of the yearly precipitation depths has been made leading to a draft map of precipitations and to the curve presenting statistical temporal distribution of yearly precipitation depth :*

— *Three categories of basins were considered :*

- *the basins whose area is less than 100 km²,*
- *the basins with area of between 100 and 1000 km²,*
- *the basins whose area covers more than 1000 km².*

In each category basins were classified by large physiographic types in relation with the nature of the soil and of the substratum. For each type a type basin has been considered : representative basin, or basin controlled by a station of the basin network. In the first case, runoff models were something used for the reconstitution of long series of a yearly

* Etude réalisée à l'initiative du C.I.E.H. et sur financement du Ministère de la Coopération.

runoff from longtime series of daily precipitations. Statistical distribution curves of yearly runoff were deduced on the basis of these series from the hundred dry year up to the hundred wet year.

This study shows that some important gaps exist in this climatic belt.

INTRODUCTION

En 1975, à la suite de la sécheresse au Sahel, l'ORSTOM avait rassemblé les données hydrologiques disponibles pour l'évaluation de l'écoulement annuel en régions sahéliennes (précipitations annuelles inférieures à 750 mm) et un document technique avait été mis au point, en vue de permettre cette évaluation dans les cas les plus courants. Mais, pour être efficace, une politique d'aménagement d'ouvrages destinés à limiter les conséquences du retour d'événements catastrophiques de ce genre ne doit pas se limiter au Sahel, elle doit s'étendre à la zone bordant le Sahel tropical africain au Sud. C'est pourquoi, dès 1975, on avait demandé à l'ORSTOM d'étudier sommairement la zone comprise entre les isohyètes 750 mm et 1 000 mm qui, pour des raisons de commodité, sera appelée dans ce qui suit « zone tropicale sèche ». Suivant les instructions du Comité interafricain d'études hydrauliques, on a complété cette étude sommaire et les résultats en sont présentés dans cette note.

On ne s'est pas limité à l'étude de la moyenne interannuelle de l'écoulement pour la raison suivante : ainsi qu'il a été précisé dans l'introduction de l'étude sur l'écoulement annuel dans le Sahel tropical africain, l'ingénieur doit, pour mettre au point un projet de réservoir, connaître non seulement les crues exceptionnelles mais également le volume annuel d'écoulement représenté par la lame d'eau écoulée supposée répartie également sur le bassin, en millimètres, cette lame d'eau étant connue non seulement par sa valeur moyenne interannuelle ou médiane mais par sa courbe de distribution statistique. En effet, le constructeur de barrage doit savoir s'il peut remplir son réservoir tous les ans ou au moins presque tous les ans et, dans le cas où il ne le remplit pas, il doit pouvoir estimer l'importance de la défaillance et sa probabilité d'occurrence.

Le but que l'on se propose peut paraître quelque peu ambitieux, mais la connaissance des années sèches a été grandement facilitée par les observations faites pendant la dernière période de sécheresse. Cependant, il convient d'insister sur le fait que ce qui suit fournit simplement des points de repères pour les études hydrologiques et non des règles rigides pour l'établissement des courbes de distribution. Les évaluations présentent le même caractère empirique que celles qui ont été faites pour le Sahel et les observations sur le terrain sont loin de couvrir toutes les conditions physiogéographiques que l'on peut rencontrer dans la zone tropicale sèche de l'Afrique occidentale.

Pour situer les conditions hydrologiques générales, précisons que le régime des cours d'eau de cette zone est caractérisé par une saison de hautes eaux de quatre à cinq mois et une saison sèche de six mois au moins avec arrêt de l'écoulement pour les petites rivières. Il n'y a pas de dégradation hydrographique sauf dans les zones extrêmement plates du Sud de la cuvette tchadienne. Cependant, l'écoulement annuel varie de l'amont à l'aval, c'est pourquoi on a considéré, comme pour les régimes sahéliens, différentes catégories de surface.

On ne doit pas confondre ce régime avec le régime tropical de transition, variante sèche, qui concerne le sud du Bénin et surtout du Togo avec des hauteurs de précipitations annuelles inférieures à 1 000 mm. Malgré certaines ressemblances, il y a des différences notables : saison des pluies plus longue, irrégularité annuelle plus grande, courbes de distribution présentant un plus grand degré d'asymétrie.

1. GÉNÉRALITÉS

On rappelle qu'il s'agit de la zone délimitée par les isohyètes 750 et 1 000 mm.

En ce qui concerne l'information disponible, la densité des postes pluviométriques est presque suffisante mais la qualité est inégale. De plus, on a été astreint à utiliser les fichiers « en l'état » et non les fichiers opérationnels qui n'existent pas. Certaines données pluviométriques sont donc entachées d'erreurs systématiques (erreur d'éprouvette par exemple) dont l'influence n'est pas très importante sur les hauteurs de précipitations des années sèches, mais qui peuvent fausser de façon significative nos conclusions relatives aux années humides.

En ce qui concerne l'écoulement, on dispose des résultats de quelques études régionales, d'un bon nombre de bassins représentatifs et de stations des réseaux hydrométriques. Cependant, le nombre de ces dernières installées sur de petits bassins reste encore assez faible, de sorte que tous les types de bassins n'ont pas été prospectés. Nos

connaissances sont maigres sur les cours d'eau du Sénégal et de l'ouest du Mali. De plus, pour faciliter les comparaisons, il faudrait que les conditions pédologiques de chaque bassin soient parfaitement définies du point de vue hydrologique, ce qui est loin d'être le cas. Il faudrait pour cela une vaste étude pédo-hydrologique qui n'a pas encore été faite. Les données pédologiques relatives aux bassins-types qui seront présentés ici sont beaucoup plus vagues que nous ne l'aurions souhaité. Mais on a considéré qu'il était préférable de présenter une étude imparfaite que rien du tout.

2. PRÉCIPITATIONS EN ZONE TROPICALE SÈCHE

Il importe de mettre au point des courbes moyennes de distribution temporelle variable bien entendu avec la valeur moyenne interannuelle ou la valeur médiane des précipitations annuelles, ce qui ne peut être fait qu'à partir de stations où la mesure des précipitations est de bonne qualité et où elle a été faite pendant une durée assez longue : vingt-cinq ans au minimum.

2.1. STATIONS PLUVIOMÉTRIQUES RETENUES

On a retenu 60 stations dont la liste est donnée ci-après. On constate que dans cette liste ne figure aucune station de la région sèche du sud du Togo, que nous ne considérons pas comme faisant partie de la zone tropicale sèche, ainsi qu'il a été indiqué plus haut.

On a marqué par un astérisque les stations dont la valeur médiane de la hauteur de précipitation annuelle est comprise entre 750 et 850 mm et par deux astérisques les stations dont la valeur médiane de la hauteur de précipitation annuelle est comprise entre 850 et 950 mm.

Sénégal :

Dialakoto**, Fatick*, Goudiry*, Guénéto**, Kaolack*, Kounghoul*, Koumpentoum*, Maka Coulibentan*, Nioro du Rip**, Tambacounda** (10 stations).

Mali :

Bafoulabé**, Bamako, Banamba*, Barouéli*, Béléko, Dioila**, Faladié, Katibougou**, Kolokani*, Koutiala, Niénébalé**, San*, Toukoto** (13 stations).

Haute-Volta :

Boromo, Dédougou, Diapaga**, Houndé, Kantchari*, Koudougou**, Koupéla*, Léo, Nouna*, Ouagadougou-Ville**, Ouagadougou-Mission*, Po**, Saria*, Tenkodogo**, Tougan*, Yako* (16 stations).

Niger :

Gaya*

Tchad :

Bouso**, Kélo, Koumra, Kyabé, Lai, Léré*, Melfi**, Pala, Tikem** (9 stations).

Cameroun :

Garoua, Guétalé**, Guider**, Kaélé**, Maroua-station*, Maroua-Salak*, Mokolo, Yagoua* (8 stations).

Empire Centrafricain :

Birao*

Bénin :

Malanville*

Togo :

Dapango.

2.2. VALEURS MOYENNES ET MÉDIANES DES HAUTEURS DE PRÉCIPITATIONS ANNUELLES

Pour ces 60 stations, on a déterminé les valeurs moyennes et médianes des hauteurs de précipitations annuelles, compte tenu des observations effectuées jusqu'en 1973 et après élimination de quelques résultats manifestement erronés, le contrôle ayant été effectué sur les originaux des hauteurs pluviométriques journalières.

Les valeurs médianes et moyennes résultant de ces données ont été reportées sur le tableau I.

TABLEAU I
VALEURS MOYENNES ET MÉDIANES DES HAUTEURS DE PRÉCIPITATIONS ANNUELLES
EN ZONE TROPICALE SÈCHE

Stations		Médianes (mm)	Moyennes (mm)	Stations		Médianes (mm)	Moyennes (mm)
<i>Sénégal</i>				<i>Haute-Volta (suite)</i>			
Dialakoto	46 ans	945	979	Saria	30 ans	825	840
Fatick	54 ans	773	778	Tenkodogo	52 ans	930	953
Goudiry	32 ans	789	777	Tougan	51 ans	770	775
Guénéto	36 ans	921	927	Yako	32 ans	736	755
Kaolack	56 ans	766	796				
Koungheul	42 ans	825	846	<i>Niger</i>			
Koumpentoum	32 ans	783	795	Gaya	41 ans	848	852
Maka Coulibentan	39 ans	821	853				
Nioro du Rip	40 ans	883	867	<i>Tchad</i>			
Tambacounda	52 ans	902	899	Bouso	29 ans	913	930
				Kélo	27 ans	993	1 042
<i>Mali</i>				Koumra	27 ans	1 015	1 026
Bafoulabé	40 ans	878	913	Kyabé	31 ans	992	1 008
Bamako	51 ans	1 041	1 067	Lai	27 ans	1 043	1 074
Banamba	40 ans	785	794	Léré	26 ans	812	825
Barouéli	38 ans	773	821	Melfi	27 ans	905	860
Béléko	27 ans	960	937	Pala	27 ans	1 043	1 054
Dioila	34 ans	921	942	Tikem	30 ans	869	882
Faladié	41 ans	1 042	1 015				
Katibougou	32 ans	885	898	<i>Cameroun</i>			
Kolokani	46 ans	848	840	Garoua	51 ans	1 011	1 030
Koutiala	51 ans	986	1 002	Guétalé	20 ans	862	823
Niébalé	43 ans	896	897	Guider	40 ans	941	939
San	51 ans	760	754	Kaélé	27 ans	888	880
Toukoto	39 ans	918	903	Maroua Station	42 ans	772	802
				Maroua Salak	21 ans	846	868
<i>Haute-Volta</i>				Mokolo	31 ans	968	967
Boromo	51 ans	976	988	Yagoua	38 ans	786	825
Dédougou	52 ans	976	957				
Diapaga	44 ans	874	862	<i>Emp. Centrafricain</i>			
Houndé	50 ans	1 021	1 031	Birao	31 ans	839	844
Kantchari	31 ans	782	805				
Koudougou	54 ans	855	870	<i>Bénin</i>			
Koupéla	49 ans	839	826	Malanville	31 ans	828	835
Léo	53 ans	1 001	1 006				
Nouna	34 ans	831	832	<i>Togo</i>			
Ouagadougou Ville	49 ans	874	868	Dapango	39 ans	1 058	1 061
Ouagadougou Mission	62 ans	801	797				
Po	32 ans	949	1 002				

Comme on devait s'y attendre, les moyennes et les médianes sont très voisines puisque les distributions sont sensiblement gaussiennes. L'écart entre ces deux valeurs ne dépasse qu'une fois 5%, sans aucune raison physique d'ailleurs. Quarante-deux stations présentent des valeurs de la médiane inférieures à celles de la moyenne et, pour dix-huit stations, c'est le contraire. Ceci tend à montrer une très légère dissymétrie des distributions.

Sur les 18 valeurs de la médiane supérieure à la moyenne : pour 7 valeurs l'écart est inférieur à 1% ce qui n'est absolument pas significatif, pour 6 valeurs l'écart est inférieur à 2%, l'écart maximal est de 5%. Il convient de se méfier des valeurs trop fortes pouvant résulter d'erreur d'éprouvette.

Notons que les distributions statistiques brutes auxquelles nous nous référons sont uniquement utilisées pour déterminer médiane ou moyenne. Pour étudier des valeurs assez fréquentes, on pourrait utiliser des lois de distribution normales, mais pour les années sèches exceptionnelles qui nous intéressent tout particulièrement ici, il faudra établir des courbes de distribution « standard » qui ne seront plus gaussiennes, en utilisant des procédés qui éliminent toute erreur accidentelle.

Pour en revenir à l'écart entre moyenne et médiane, il dépasse + 2% dans des cas sans grand rapport avec la situation géographique. On admettra donc que ces écarts sont purement accidentels et que sur une très longue période, la moyenne est très sensiblement égale à la médiane. (On rappelle que pour les régions sahéliennes, on avait admis un écart moyen de + 2%.)

2.3. RÉPARTITION SPATIALE DES PRÉCIPITATIONS

On a reproduit ci-après la carte (1a et 1b) des précipitations moyennes annuelles. Elle est à utiliser avec précaution dans les régions accidentées, par exemple dans les montagnes du Nord-Cameroun où la hauteur de précipitations annuelle varie très nettement avec l'exposition et l'altitude.

2.4. DISTRIBUTION STATISTIQUE DES PRÉCIPITATIONS ANNUELLES

2.4.1. Méthode utilisée

On s'est intéressé tout particulièrement aux années déficitaires de faible fréquence. Il n'est pas possible pour cela d'utiliser les courbes individuelles de chaque station pour une raison simple. Suivant les périodes de sécheresse, celle de 1913, celle de 1941-1945, celle de 1965-1974, la station étudiée peut être épargnée ou, au contraire, être affectée plus gravement que les régions voisines. Ceci a été montré très nettement lors de la dernière sécheresse. La courbe établie pour une station donnée peut donc présenter, pour les périodes de retour 25 ou 50 ans, des valeurs beaucoup trop faibles ou beaucoup trop fortes. On a donc déterminé, pour les années sèches, les hauteurs de précipitation suivant le procédé des stations-années.

En fonction de la médiane, les stations pluviométriques ont été classées en trois groupes correspondant chacun à une bande pluviométrique : la bande 750 mm à 850 mm, la bande 850 à 950 mm et la bande 950 à 1 050 mm pour lesquelles les hauteurs pluviométriques moyennes devraient être respectivement 800 mm, 900 mm et 1 000 mm.

Dans chaque groupe, on a classé les hauteurs de précipitations annuelles par ordre décroissant pour les plus fortes et les plus faibles, en considérant le groupe comme un échantillon unique.

On a vérifié auparavant que la valeur pondérée de la moyenne pour chaque groupe de stations est très proche de la valeur 800 mm, 900 mm et 1 000 mm.

Les stations de chaque groupe peuvent être retrouvées au paragraphe 2.1.

Pour chaque groupe de stations, l'échantillon dépasse 600 stations-années.

La fréquence expérimentale au dépassement d'une station de rang n est égale à $\frac{n - 1/2}{N}$. Par exemple, pour la bande pluviométrique 800 mm la hauteur de précipitation la plus faible a une fréquence expérimentale égale à $\frac{950,5}{951}$ (il y a 951 stations-années, soit $N = 951$). Par interpolation, on détermine facilement les fréquences annuelles sèches et humides : 0,90, 0,95, 0,98, 0,99 de l'échantillon. On néglige bien entendu les valeurs extrêmes qui ne sont pas significatives. On admet que les hauteurs de précipitations de fréquence F ainsi déterminées correspondent « en moyenne » à la hauteur de précipitation moyenne (ou médiane) de 800 mm.

2.4.2. Résultats statistiques

Les résultats bruts sont donnés ci-après :

2.4.2.1. Tranche 750|850 mm (P médiane = 800 mm)

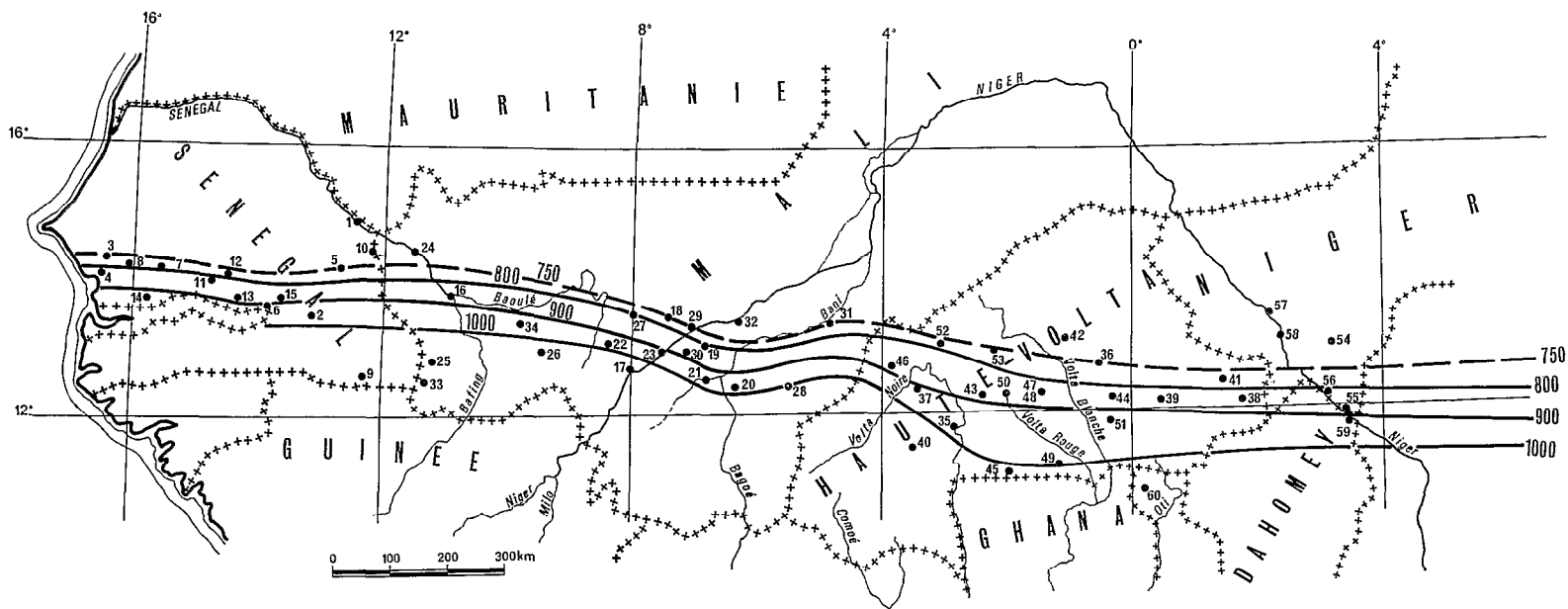
Nombre de stations : 24.

Nombre de stations-années : 951.

Médiane pondérée : 798 mm.

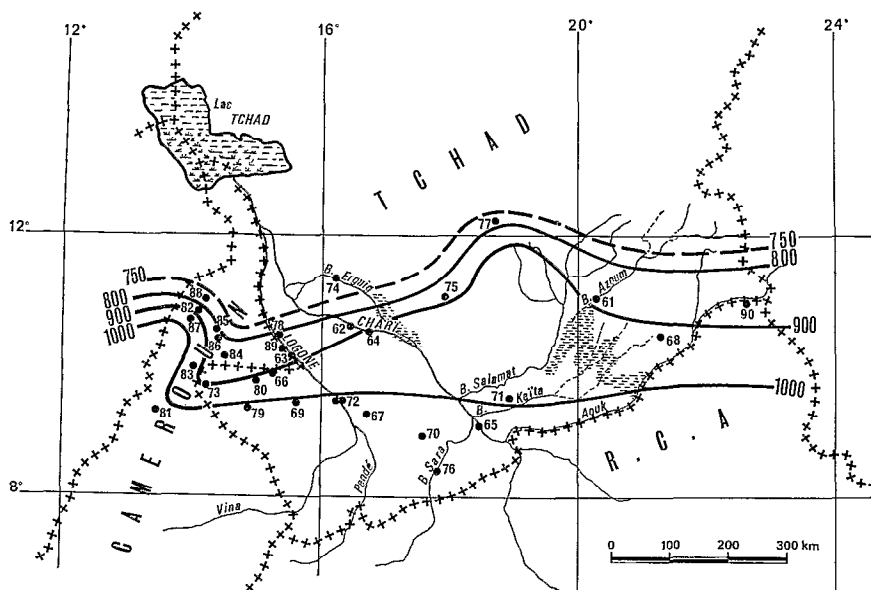
Les fréquences faibles : sèches ou humides correspondent aux hauteurs de précipitations suivantes :

<i>Années sèches</i>		<i>Années humides</i>	
F = 0,90 ou $F_1 = 0,10$	P = 605 mm	F = 0,10	P = 1 015 mm
F = 0,95 ou $F_1 = 0,05$	P = 560 mm	F = 0,05	P = 1 080 mm
F = 0,98 ou $F_1 = 0,02$	P = 485 mm	F = 0,02	P = 1 190 mm
F = 0,99 ou $F_1 = 0,01$	P = 460 mm	F = 0,01	P = 1 220 mm



Carte 1 a. — Précipitations annuelles dans la zone tropicale sèche

<i>Sénégal</i>		<i>Mali</i>		33	Satadougou	49	Po
1	Bakel	16	Bafoulabé	34	Toukoto	50	Saria
2	Dialakoto	17	Bamako	<i>Haute-Volta</i>			
3	Fatick	18	Banamba	35	Boromo	51	Tenkodogo
4	Foundiougne	19	Barouéli	36	Boulsa	52	Tougan
5	Goudiry	20	Béléko	37	Dédougou	53	Yako
6	Guénéto	21	Diouila	38	Diapaga	<i>Niger</i>	
7	Kaffriné	22	Faladié	39	Fada N'Gourma	54	Dosso
8	Kaolack	23	Katibougou	40	Houndé	55	Gaya
9	Kédougou	24	Kayes	41	Kantchari	56	Koulou
10	Kidira	25	Kéniéba	42	Kaya	57	Niamey
11	Koungheul	26	Kita	43	Koudougou	58	Say
12	Koumpentoum	27	Kolokani	44	Koupéla	<i>Déniin</i>	
13	Maka Coulibentan	28	Koutiala	45	Léo	59	Malanville
14	Nioro du Rip	29	Nyamina	46	Nouna	<i>Togo</i>	
15	Tambacounda	30	Niéénébalé	47	Ouagadougou (Ville)	60	Dapango
		31	San	48	Ouagadougou (Mission)		
		32	Ségou				



Carte 1 b. — Précipitations annuelles dans la zone tropicale sèche

<i>Tchad</i>	67 Guidari	74 Massenya	<i>Cameroun</i>	87 Mokolo
61 Am Timan	68 Harazé	75 Meifé	81 Garoua	88 Mora
62 Ba-Illi	69 Kélo	76 Moïssala	82 Guétalé	89 Yagoua
63 Bongor	70 Koumra	77 Mongo	83 Guider	
64 Bousso	71 Kyabé	78 Billiam Oursi	84 Kaélé	<i>E.C.A.</i>
65 Sahr	72 Lai	79 Pala	85 Maroua (Station)	90 Birao
66 Fianga	73 Léré	80 Tikem	86 Maroua Salak	

2.4.2.2. Tranche 850/950 mm (P médiane = 900 mm)

Nombre de stations : 20.

Nombre de stations-années : 766.

Médiane pondérée : 900 mm.

Les fréquences faibles : sèches ou humides correspondent aux hauteurs de précipitations suivantes :

Années sèches

$F_1 = 0,10$	P = 685 mm
$F_1 = 0,05$	P = 620 mm
$F_1 = 0,02$	P = 550 mm
$F_1 = 0,01$	P = 505 mm

Années humides

F = 0,10	P = 1 130 mm
F = 0,05	P = 1 205 mm
F = 0,02	P = 1 300 mm
F = 0,01	P = 1 400 mm

2.4.2.3. Tranche 950/1 050 mm (P médiane = 1 000 mm)

Nombre de stations : 16.

Nombre de stations-années : 636.

Médiane pondérée : 1 008 mm.

Les fréquences faibles : sèches ou humides, correspondent aux hauteurs de précipitations suivantes :

Années sèches

$F_1 = 0,10$	P = 825 mm
$F_1 = 0,05$	P = 740 mm
$F_1 = 0,02$	P = 670 mm
$F_1 = 0,01$	P = 645 mm

Années humides

F = 0,10	P = 1 225 mm
F = 0,05	P = 1 305 mm
F = 0,02	P = 1 375 mm
F = 0,01	P = 1 420 mm

2.4.3. *Mise au point des courbes de distribution*

Les résultats obtenus pour la courbe de distribution 800 mm s'ajustent bien avec la courbe de distribution 750 mm que nous avons déterminée pour la zone sahélienne (voir fig. 1).

L'ajustement graphique d'un faisceau de courbes correspondant respectivement à une hauteur de précipitation médiane de 800 mm, 900 mm et 1 000 mm conduit, pour les périodes de retour 10 ans, 20 ans, 50 ans et 100 ans aux hauteurs de précipitations annuelles sèches et humides du tableau ci-après.

TABLEAU II
PLUVIOMÉTRIE ANNUELLE

Valeur médiane de la hauteur de précipitation annuelle (mm)		Fréquence (F_1 ou F)			
		0,10 (mm)	0,05 (mm)	0,02 (mm)	0,01 (mm)
800	S	600	550	500	470
	H	1 030	1 110	1 200	1 250
900	S	680	630	580	550
	H	1 130	1 200	1 280	1 350
1 000	S	800	750	690	650
	H	1 220	1 290	1 370	1 430

S : année sèche (F_1)
H : année humide (F)

Les courbes de la figure 1 correspondent aux cas les plus fréquents. Il existe des sites particuliers pour lesquels la distribution des précipitations annuelles présente une asymétrie plus forte ou plus faible que dans le cas général et pour lesquels, par conséquent, les valeurs exceptionnellement faibles sont nettement inférieures ou supérieures à celles indiquées par la figure.

3. ÉCOULEMENT ANNUEL EN RÉGIONS TROPICALES SÈCHES

3.1. MÉTHODOLOGIE

La démarche la plus simple qui vient à l'esprit consisterait à considérer, pour un bassin de hauteur de précipitation médiane déterminée, la courbe de la figure 1 correspondant à cette hauteur moyenne et à multiplier les ordonnées de cette courbe par un coefficient d'écoulement, ce coefficient d'écoulement décroissant lorsque la hauteur annuelle de précipitation décroît.

Mais on connaît mal ces variations du coefficient d'écoulement et les résultats bruts des bassins représentatifs ne peuvent pas être utilisés sans précaution pour déterminer ces variations. En effet, pour un bassin dont la hauteur de précipitation annuelle est de 900 mm par exemple (valeur médiane), à chaque valeur de la hauteur de précipitation annuelle, surtout pour les valeurs déficitaires, correspond une infinité de valeurs de l'écoulement, donc du coefficient d'écoulement suivant la répartition des averses au cours de la saison des pluies, averses dont la hauteur totale constitue la hauteur de précipitation annuelle P . Ces valeurs de l'écoulement admettent une valeur médiane et l'ensemble des valeurs médianes de l'écoulement pour toutes les valeurs de P constitue la courbe que nous cherchons à établir.

Bien entendu, nous n'avons pas les éléments pour établir cette courbe dans des conditions confortables. On

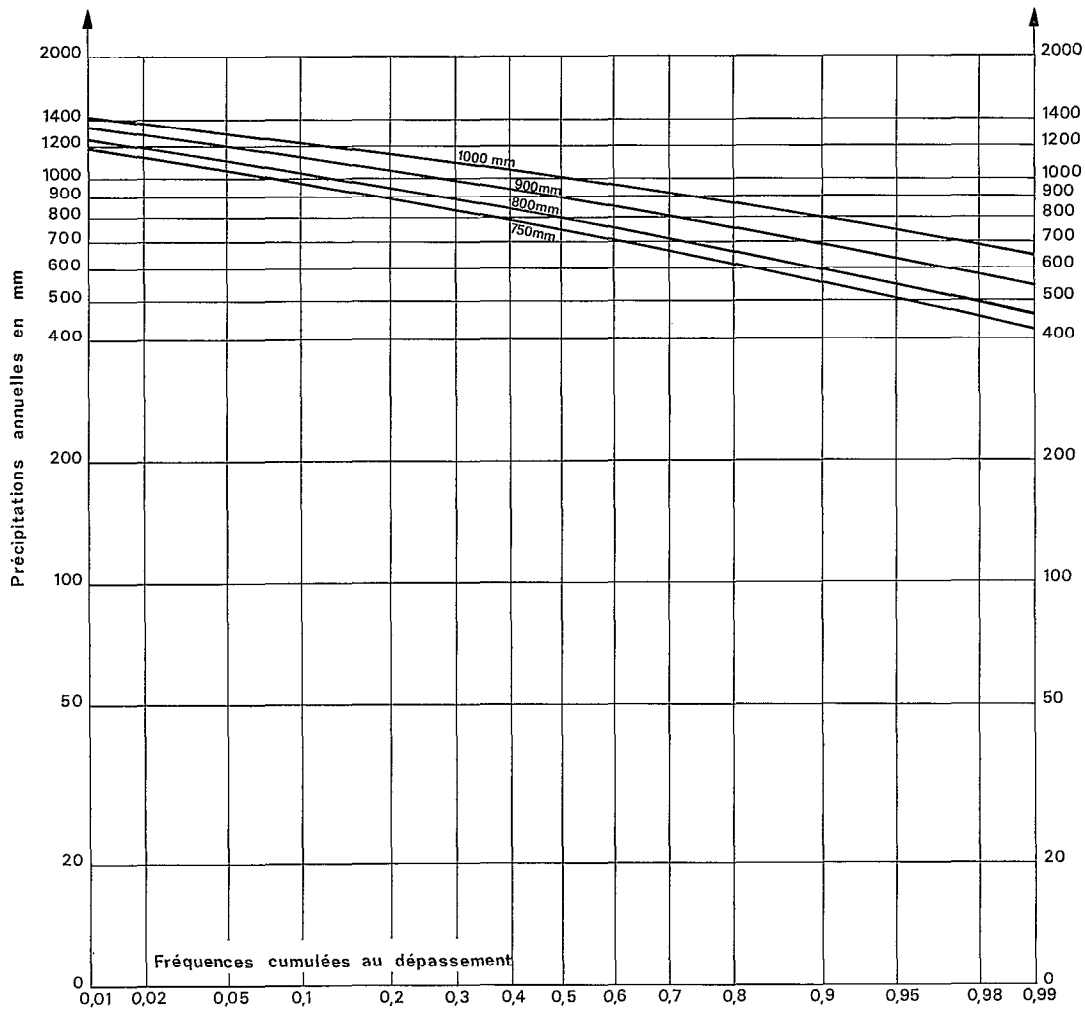


Fig. 1. — Distributions temporelles des précipitations annuelles dans la zone 750-1 000 mm (littoral exclu)

a opéré comme suit pour un certain nombre de bassins où les observations et mesures sont satisfaisantes. On a reconstitué de longues séries d'écoulements annuels de la façon suivante :

On utilise un modèle simplifié mis au point par G. GIRARD pour transformer, à l'échelle journalière les averses en millimètres en lame d'eau écoulée en millimètres.

L'équation de base pour une averse est

$$E = K_0 (P - H_0)$$

P : hauteur de précipitation de l'averse en millimètres.

E : écoulement en millimètres.

H_0 varie de 0 (en fait de $\epsilon = 2$ ou 4 mm) à H_0 max, H_0 max correspondant à un sol sec varie avec la capacité de rétention des sols, l'amplitude des variations annuelles du stock d'eau dans le sol et la structure générale des précipitations.

K_0 coefficient d'écoulement est lié à l'extension des zones à rétention définitive dans le bassin, à la perméabilité, à la surface du bassin.

Pour déterminer H_0 on passe par H_j :

$$H_j = (PH_{j-1} + H_{j-1}) C$$

PH_{j-1} : précipitation du jour antérieur,

H_{j-1} : valeur de H calculée le jour $j - 1$ fonction des précipitations antérieures au jour $j - 1$,

C : paramètre de réglage compris entre 0 et 1 voisin de 0,7.

Si $H_j > H_o \text{ max}$, $H_o = 0$.

Si $H_j = 0$, $H_o = H_o \text{ max}$ (début de la saison des pluies).

Si $0 < H_j < H_o \text{ max}$, $H_o = H_o \text{ max} - H_j$.

Chaque lame d'eau journalière est déterminée par ces équations et le total annuel constitue la lame d'eau annuelle. Chaque lame d'eau journalière est déterminée avec une assez faible précision, mais le total mensuel est acceptable et le total annuel est bon.

On fait passer, dans le modèle, plusieurs longues séries de précipitations (25 à 40 ans) journalières pour des stations pluviométriques ayant le même régime que le bassin étudié. On en déduit plusieurs séries d'écoulements, chacune donnant lieu à une courbe de distribution statistique. On prend la courbe moyenne et on utilise, pour extrapoler cette courbe vers les valeurs extrêmes, d'une part la courbe de distribution des précipitations établie au paragraphe 2.4, d'autre part, des valeurs du coefficient d'écoulement correspondant, pour les années sèches, à une décroissance de ce coefficient d'écoulement en rapport avec les variations observées sur les éléments de courbes de distribution établies avec le modèle ; pour les années humides, à une croissance raisonnable de ce coefficient d'écoulement.

On détermine ainsi la courbe de distribution pour un régime pluviométrique correspondant à l'isohyète annuelle 800 mm en année médiane, par exemple.

Il est assez facile de déterminer les mêmes courbes pour les isohyètes annuelles 900 et 1 000 mm en admettant les mêmes coefficients d'écoulement pour la même hauteur de précipitations.

Par exemple, pour avoir la valeur médiane de l'écoulement pour l'isohyète annuelle 900 mm, on prend sur la courbe 800 mm l'écoulement correspondant à une hauteur de précipitation 900 mm qui est excédentaire pour la courbe 800 mm et qui correspond à la valeur médiane pour la courbe 900 mm. Ceci est possible pour des hauteurs de précipitations voisines mais impossible si l'écart est trop grand.

Par exemple, une hauteur annuelle de 800 mm sous l'isohyète 500 mm est répartie sur une plus courte durée que la même hauteur de 800 mm sous l'isohyète 1 000 mm. Dans le premier cas, le coefficient d'écoulement sera plus élevé que dans le second.

On établit ainsi, pour chaque bassin ayant fait l'objet de la mise au point d'un modèle simplifié, un faisceau de courbes de l'isohyète annuelle médiane 750 mm à l'isohyète annuelle médiane 1 000 mm.

Pour les autres bassins représentatifs, on détermine tant bien que mal le coefficient d'écoulement en durée médiane, on estime la fréquence des années d'observations, compte tenu de la répartition des averses d'où on déduit les variations du coefficient d'écoulement avec la fréquence et la courbe de distribution de l'écoulement à partir de la courbe de distribution des précipitations annuelles (fig. 1), on est guidé dans ces extrapolations par les courbes établies suivant le premier procédé (usage du modèle simplifié) qui correspond à des estimations beaucoup plus sûres.

Ces méthodes sont utilisables seulement pour les petits bassins versants. Pour les bassins dépassant 1 000 km², la mise au point de modèles simplifiés bute sur le problème de la prise en compte des précipitations journalières ponctuelles, la seule solution consiste à mettre au point la courbe de distribution des écoulements annuels à partir des séries fournies par les stations du réseau hydrométrique. Celles-ci contiennent les années sèches de 1970 à 1974. On ne s'est pas risqué, pour ces bassins, à une transposition pour tracer le faisceau de courbes pour chaque type de bassin entre 750 mm et 1 000 mm. Cette opération étant assez hasardeuse.

Pour les bassins de 100 à 1 000 km², on utilise également les données des réseaux, les données des études régionales ou des rares bassins représentatifs d'assez grande surface pour lesquels une étude approfondie tenant compte de la répartition des averses au cours de la saison des pluies conduit à une appréciation de la fréquence des écoulements observés et parfois à la mise au point d'une partie de la courbe de distribution des écoulements annuels. Pour cette même catégorie de bassin, on peut également compléter les éléments de courbes en interpolant entre les courbes obtenues sur de petits bassins et celles des bassins de plus de 1 000 km².

Ces différences de méthodologie, et la décroissance, bien que relativement faible, de l'écoulement annuel de l'amont vers l'aval, nous ont conduit à partager les bassins en trois catégories : ceux de superficie inférieure à 100 km², ceux couvrant 100 à 1 000 km² et les bassins de plus de 1 000 km². On a jugé inutile de classer à part les bassins de superficie voisine de 5 km² qui peuvent être surtout intéressants pour l'aménagement des eaux en zone sahéenne, car ce sont souvent les seuls pour lesquels il n'y a pas encore de dégradation hydrographique, mais ils le sont beaucoup moins en zone tropicale sèche.

3.2. BASSIN VERSANT DE SUPERFICIE INFÉRIEURE A 100 KM²

Les études disponibles concernent surtout des bassins représentatifs de superficie comprise entre 10 et 30 km², pour lesquels souvent l'ORSTOM rapporte les résultats à une superficie standard de 25 km².

3.2.1. Information disponible

Elle est basée sur les observations et mesures sur bassins représentatifs. On a reproduit ci-après tous les résultats obtenus à l'échelle annuelle concernant précipitation et écoulement. Certaines données peuvent être différentes de celles publiées dans le *Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux* par suite de révision ultérieure des données brutes.

Les bassins ci-après sont classés par ordre de hauteurs pluviométriques annuelles croissantes (Dd : densité de drainage, Ig : indice global de pente).

	Dd	Ig	Année	P (mm)	E (mm)	Ke (%)
BOULSA (Haute-Volta)				méd. 750		
Koghnéré, S = 22 km ² , arènes	0,682	4,26	1960	725	28,4	3,9
			1961	685	16,6	2,4
			1962	1 140	123	10,8
Kogho, S = 84,7 km ² , arènes	0,98	2,29	1960	775	26,2	3,4
			1961	675	5,9	0,9
			1962	1 120	94	8,4
BARLO (Tchad)				méd. 790-800		
Bassin réduit, S = 17,8 km ² , granite	2,48	29	1959	721	(80)	11
Grand bassin, S = 36,6 km ² , granite	2,08	22	1958	710	(40)	5,6
			1959	643	58,7	9,2
MOTORSOLO (Cameroun)				méd. 800-820		
S ₁ Leleng, S = 4 km ² , granite	8,52	45,5	1966	740	175	24
			1967	792	263	33
			1968	978	512,3	52
			1969	960	249	26
S ₄ Godola, S = 42 km ²	5,83	15,3	1968	918	299	33
			1969	909	147	16
BOULORÉ (Cameroun)				méd. 800-820		
S = 3,75 km ² , roche verte andésitique	5,54	58	1954	(850)	≥ 92 (1)	> 12,5
			1955	831	46,1	5,6
KOULOU (Niger)				méd. 840		
Banigouou, S = 17,3 km ² , cuirasse latéritique	1,57	6,52	1960	760	14,1	1,9
			1961	734	27,8	3,8
YOLDÉ (Niger)				méd. 840		
S = 82,6 km ² , grès et argile de bas-fond argileux	1,24	6,0	1960	(676)	1,45	0,22
			1961	(734)	8,9	1,22
BIDJIR (Tchad)				méd. 850		
S = 74,2 km ² , granite	3,07		1963	684	2,4	0,35
			1964	1 079	146	13,6
			1965	750	2,8	0,37
			1966	752	14,5	1,93
TOUNKOUL (Tchad)				méd. 850		
S = 61,3 km ² , granite	3,86	6,0	1963	678	3,2	0,48
			1964	951	146	15,5
			1965	829	65	7,8
			1966	655	17	2,6

(1) E est calculé à partir du 1^{er} juin. P du 1^{er} juin au 31 décembre est égal à 730 mm.

	<i>Dd</i>	<i>Ig</i>	<i>Année</i>	<i>P</i> (<i>mm</i>)	<i>E</i> (<i>mm</i>)	<i>Ke</i> (%)
OUAGADOUGOU (Haute-Volta)				méd. 850		
<i>Moro Naba</i> , S = 19,1 km ² , granite	0,67	7,10	1961	800	65	8,2
			1962	1 080	307	28
			1963	(600)	67	(10)
ZAGTOULI (Haute-Volta)				méd. 850		
S = 6,65 km ² , granite	1,12	9,5	1962	900 (1)	212	24
			1963	(600)	16,4	2,74
BAZOULÉ (Haute-Volta)				méd. 850		
S = 12,8 km ² , granite	0,66	7,1	1962	800	32,2	4
			1963	(640) (2)	3,8	0,6
SÉLOGEN (Haute-Volta)				méd. 900		
S = 74 km ² , granite migmatite			1961	780	40,5	5,17
			1962	900	100	11,1
			1963	906	175	19,3
MAYO LIGAN (Tchad)				méd. 900		
S = 41 km ² , grano-diorite	1,87	8	1961	(850)	225	(26,5)
			1964	805	122	15,2
			1965	(1 100)	419	(38)
MAYO KERENG (Cameroun)				méd. 920		
S = 4 km ² , schistes embréchites	4,15	11,6	1955	(600)	78,5	(13,1)
			1956	(750)	161,9	(21,6)
MANGA (Haute-Volta)				méd. 920		
<i>Louré</i> , S = 98 km ² , granite	2,06	4,2	1963	(925)	184	(20)
			1964	(895)	262	(29,2)
			1965	(843)	153	(17,5)
<i>Kazanga</i> , S = 54,3 km ² , granite	2,41	4,6	1963	(810)	150,5	(18,6)
			1964	(826)	219	(26,5)
			1965	(800)	93,3	(11,7)
<i>Zaptinga</i> , S = 15,1 km ² , granite	3,19	5,08	1964	(964)	255	(26,5)
			1965	(795)	66,7	(8,4)
<i>Binndé</i> , S = 9,1 km ² , granite 95% schiste 5%	2,66	6,5	1963	(740)	76	(10,3)
			1964	(929)	192	(20,7)
			1965	(815)	77	(9,5)
MOKOLO (Cameroun)				méd. 970		
S = 48,9 km ² , granite		25,8	1974	1 020	233	23
			1975	1 241	573	46
NADJOUNDI (Togo)				méd. 1 050		
S = 21,2 km ² , granite	2,45	8,8	1963	977	174	17,8
NABAPOUR (Togo)				méd. 1 070		
S = 61,4 km ² , schistes + grès imperméables	0,71	10,6	1959	967	(123)	12,7
			1960	883	(82)	≅ 10
			1961	895	(140)	15,6

(1) Peu précis, P sous-estimé ?

(2) Decennal sec ?

	<i>Dd</i>	<i>Ig</i>	<i>Année</i>	<i>P</i> (mm)	<i>E</i> (mm)	<i>Ke</i> (%)
KOUMFAB (Togo)				méd. 1 070		
S = 96,2 km ² , grès perméables	0,93	4,97	1959	(970)	(141)	(14,5)
			1960	886	127,7	14,6
			1961	853	166,8	19,5
DJITIKO (Mali)				méd. 1 100		
S = 100 km ² (1), grès	1,59	4,6	1960	1 100	123	11,2
			1968	930	85	9,1

(1) 92,3 sans la zone endoréique.

Les totaux pluviométriques entre parenthèses correspondent à des années pour lesquelles les précipitations de certains mois de saison sèche (avril, mai ou parfois novembre) ont été reconstituées par corrélation avec les résultats de stations voisines. Ces valeurs entre simples parenthèses ne s'écartent certainement pas beaucoup des valeurs réelles.

3.2.2. Valeurs médianes de l'écoulement

Dans ce qui suit on a tenté de déterminer les valeurs médianes en les ramenant chaque fois que c'était possible à une surface de 25 km² lorsque le bassin représentatif étudié présentait une superficie trop éloignée de 25 km² : par exemple 80 km² ou 3 km². Cette évaluation est très facile lorsque le bassin a été étudié avec le modèle simplifié, comme c'est le cas des bassins de Binndé, du Motorsolo (Godola et Leleng) et de Mokolo. Lorsque ce n'est pas le cas, au cours des études des bassins représentatifs, des études approfondies ont permis d'arriver à une valeur de l'écoulement médian, en tenant compte de la répartition mensuelle des précipitations et de l'hydraulicité des années observées sur les bassins voisins.

On aboutit aux résultats suivants classés par ordre croissant du coefficient d'écoulement :

<i>Bassin</i>	<i>Précipitation médiane</i> (mm)	<i>Écoulement médian</i> (mm)	<i>Coefficient d'écoulement</i> (%)
<i>Bassins sur granite et granito gneiss</i>			
Bazoulé	850	17 à 25	2 à 3
Kogho	750	30 à 37	4 à 5
Koghneré	750	30 à 37	4 à 5
Toukoul	850	70	8
Moro Naba	850	75	9
Barlo	790-800	70 à 85	9 à 11
Zagtouli	850	85 à 100	10 à 12
Sélogon	900	135	15
Binndé	920	140	15
Zaptinga	920	140	15
Nadjoundi	1 050	210	20
Louré	920	185	20
Kazanga	920	185	20
Motorsolo (Godola)	800-820	180	22
Mokolo	970	223	23
Mayo Ligan	900	252	28
<i>Bassins sur grès. Ils sont beaucoup moins nombreux</i>			
Banigorou	840	33 à 42	4 à 5
Nabapour	1 070	118	11
Djitiiko	1 100	165	15
Koumfab	1 070	180 ?	17
<i>Bassins sur schistes</i>			
Mayo Kereng	920	140 ?	15 ?

Si l'information relative aux formations sur granite est importante, celle sur les grès est faible et celle sur schistes est presque inexistante. Il est difficile d'extrapoler pour le Mayo Kereng de 4 km² à 25 km². Il est bon de dire aussi que l'influence du sol est beaucoup plus importante que celle du sous-sol.

Les granites recouverts en partie d'arènes granitiques, comme pour le bassin de Bidjir, ruissellent beaucoup moins que ceux recouverts de sols halomorphes imperméables, comme pour le bassin du Mayo Ligan. Cependant, la nature du sol correspond assez souvent à celle du sous-sol. Il n'a pas été possible, malheureusement, de donner une classification des sols des bassins représentatifs en rapport avec leur aptitude au ruissellement.

3.2.3. Courbes de distribution des bassins sur granite et granito-gneiss

Le coefficient d'écoulement varie de 2 à 3% à près de 30% c'est-à-dire de 1 à 10. Comme on l'a vu plus haut, l'influence du sol, pour un même substratum, est très sensible, la pente joue aussi son rôle.

Les éléments pédologiques nous manquent pour procéder à une étude en règle de l'influence de ces divers facteurs, nous considérerons donc, comme ceci a été fait pour le régime sahélien, des bassins types correspondant aux paysages des divers bassins représentatifs avec leurs séries de sols et leurs caractéristiques géomorphologiques.

Pour chaque bassin type, on a défini par trois points les courbes de distribution correspondant aux valeurs médianes de la précipitation annuelle du bassin représentatif (ou une valeur voisine) aux valeurs extrêmes 750 et 1 000 mm avec quelquefois une valeur intermédiaire : 850 mm.

Pour les bassins sur granite et granito-gneiss, quatre bassins ont été étudiés sur modèle : Mokolo, Godola, Leleng et Binndé.

3.2.3.1. Bassin-type Mayo-Ligan

Le bassin représentatif reçoit en année médiane 900 mm.

On a ramené le coefficient de ruissellement aux valeurs médianes de la hauteur de précipitation égales à 1 000 mm et à 750 mm, soit à des valeurs de Ke égales respectivement à 30% et 18%.

On a considéré une forme de courbe de distribution semblable à celles tracées pour les bassins types Godola.

La courbe est définie par les trois points ci-dessous correspondant aux fréquences au dépassement indiquées après chaque valeur de P, E ou Ke.

Les valeurs de P sont déduites de la figure 1.

Précipitation médiane 1 000 mm

P méd. = 1 000 mm	E méd. = 300 mm	Ke méd. = 30 %
P 0,95 = 750 mm	E 0,95 = 120 mm	Ke 0,95 = 16 %
P 0,05 = 1 300 mm	E 0,05 = 580 mm	Ke 0,05 = 44,5 %

Précipitation médiane 750 mm

P méd. = 750 mm	E méd. = 135 mm	Ke méd. = 18 %
P 0,95 = 505 mm	E 0,95 = 50,5 mm	Ke 0,95 = 10 %
P 0,05 = 1 050 mm	E 0,05 = 345 mm	Ke 0,05 = 33 %

On a reporté sur la figure 2 la courbe P médiane 1 000 mm représentant E en coordonnées logarithmiques, en fonction de la fréquence cumulée de P en coordonnées gaussiennes.

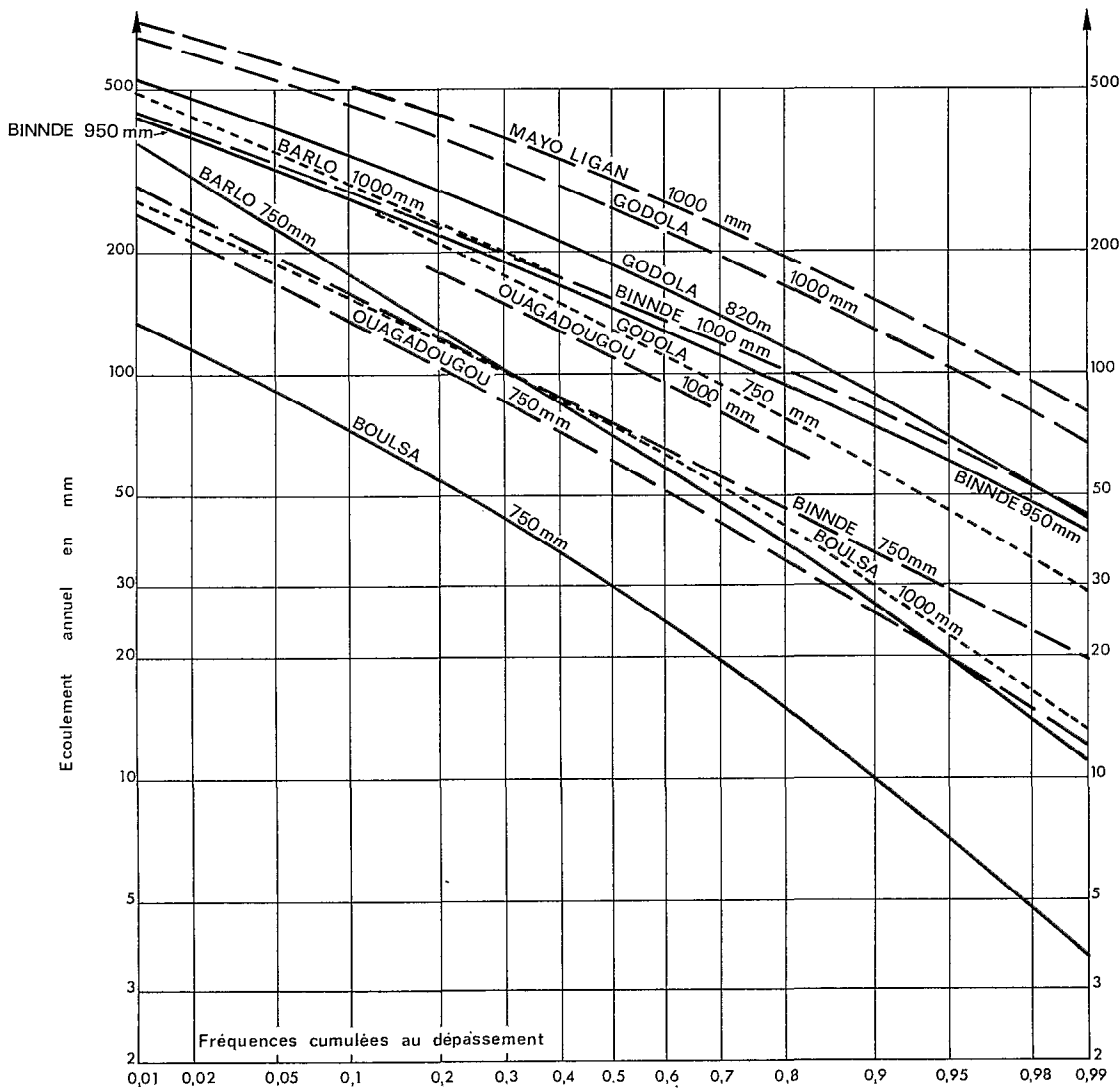
La courbe P médiane 750 mm n'a pas été reportée sur la figure qui est déjà passablement encombrée : elle est comprise entre la figure Godola 750 mm et Binndé 950 mm ou Barlo 1 000 mm, dont il sera question plus loin.

Ces bassins sont caractérisés par des roches granitiques recouvertes de sols halomorphes imperméables avec pentes assez fortes : Ig = 10 pour 25 km². Ce sont là des conditions maximales pour l'écoulement annuel.

3.2.3.2. Bassins-types Godola

Ce sont les courbes les mieux connues puisqu'elles ont été mises au point à partir de longues séries de précipitations en utilisant le modèle simplifié de Girard.

La série de courbes de distribution adoptée a été déduite par interpolation entre celles du bassin de Godola et du Leleng, après une légère rectification des courbes originales pour mettre en accord les séries de précipitations passées sur les modèles Girard avec les courbes de distribution des précipitations de la figure 1.



Nota : La courbe Barlo 1 000 mm a été volontairement interrompue vers la droite ; elle est très voisine de la courbe Binndé 950 mm un peu en-dessous vers les fréquences 0,95 à 0,99

Fig. 2. — Ecoulement annuel dans la zone tropicale sèche. P = 750-1 000 mm. Distributions statistiques. Sur sol granite ou granito-gneiss. Bassins de 25 km²

On trouve donc, pour la courbe isohyète 820 qui correspond aux deux bassins étudiés (Godola S = 42 km², Leleng S = 4 km²).

E 0,95 Godola = 60 mm E 0,95 Leleng = 110 mm
E 0,05 Godola = 360 mm E 0,05 Leleng = 500 mm

On interpole entre ces valeurs pour trouver les valeurs correspondant à S = 25 km². On trouve ainsi pour l'isohyète 820 mm les trois valeurs suivantes :

P méd. = 820 mm	E méd. = 180 mm	Ke méd. = 22 %
P 0,95 = 590 mm	E 0,95 = 70 mm	Ke 0,95 = 11,8 %
P 0,05 = 1 150 mm	E 0,05 = 400 mm	Ke 0,05 = 35 %

On en déduit, par extrapolation, les trois points de bases définissant les courbes P médiane 1 000 mm et P médiane 750 mm.

Précipitation médiane 1 000 mm

P méd. = 1 000 mm	E méd. = 250 mm	Ke méd. = 25 %
P 0,95 = 750 mm	E 0,95 = 102 mm	Ke 0,95 = 13,5 %
P 0,05 = 1 300 mm	E 0,05 = 520 mm	Ke 0,05 = 40 %

Précipitation médiane 750 mm

P méd. = 750 mm	E méd. = 125 mm	Ke méd. = 17 %
P 0,95 = 505 mm	E 0,95 = 45 mm	Ke 0,95 = 9 %
P 0,05 = 1 050 mm	E 0,05 = 315 mm	Ke 0,05 = 30 %

Ces courbes ont été reportées sur la figure 2.

Ces bassins sont caractérisés par une forte pente ($I_g = 20$ à 25 m/km pour $S = 25$ km²), des sols de piémont formant glacis imperméables, mais ils contiennent aussi des arènes granitiques et des lits alluviaux sableux qui absorbent une partie des apports. Ils sont très cultivés.

Le bassin de Mokolo, qui a été étudié sur modèle, a un régime d'écoulement très proche de celui de Godola.

Les sols y sont peut-être un peu plus perméables (prédominance des arènes granitiques) mais les précipitations y sont plus abondantes (P médiane = 970 mm au lieu de P médiane = 800-820 mm), ce qui compense.

Celui de Nadjoundi présenterait le même type d'écoulement s'il présentait la même pente. Mais avec $I_g = 8,8$ au lieu de 20 à 25 le coefficient d'écoulement correspondant à P médiane = 820 mm au lieu de 105 serait à réduire de 25% par rapport à celui de Godola. Il serait donc de 17% au lieu de 22%. Ceci donne une idée du décalage à faire subir aux courbes de Godola 1 000 mm et 750 mm pour qu'elles correspondent aux conditions de Nadjoundi 1 000 mm et 750 mm.

3.2.3.3. *Bassins-types Barlo*

On est parti de la courbe 750 mm établie dans l'étude générale sur l'écoulement en régime sahélien défini comme suit :

P méd. = 750 mm	E méd. = 71,3 mm	Ke méd. = 9,5 %
P 0,99 = 430 mm	E 0,99 = 11 mm	Ke 0,99 = 2,6 %
P 0,01 = 1 180 mm	E 0,01 = 378 mm	Ke 0,01 = 32 %

On rappelle que le bassin représentatif reçoit en année médiane 790 à 800 mm. Bien entendu, la courbe Barlo 800 mm est un peu au-dessus de la courbe Barlo 750 mm avec Ke médiane = 10%, elle n'a pas été reproduite sur la figure 2.

La courbe Barlo 1 000 mm se déduit par extrapolation, elle est définie par les points suivants :

P méd. = 1 000 mm	E méd. = 150 mm	Ke méd. = 15 %
P 0,99 = 650 mm	E 0,99 = 40 mm	Ke 0,99 = 6 %
P 0,01 = 1 410 mm	E 0,01 = 95 mm	Ke 0,01 = 35 %

Seule la partie gauche de la courbe a été reproduite sur le graphique 2, la partie droite est comprise entre les courbes Binndé 950 mm et Binndé 1 000 mm très voisines.

Les bassins de ce type présentent de fortes pentes $I_g = 25$ m/km pour $S = 25$ km², mais ils contiennent beaucoup plus de sols perméables (arènes et sables) que les bassins-types Godola, ils sont également très cultivés. Le bassin de Tounkoul est à ranger dans cette catégorie.

3.2.3.4. *Bassins-types Binndé*

La courbe de distribution a été étudiée grâce au modèle simplifié. Elle a subi deux séries de corrections : l'une pour passer de la distribution des précipitations utilisées dans le modèle à la courbe de distribution correspondante de la figure 1, l'autre pour tenir compte de la différence entre la superficie de Binndé 9,1 km² et la superficie standard 25 km².

Le bassin étudié reçoit 920 mm/an. On a tracé la courbe 950 mm qui présente les mêmes coefficients d'écoulement. Elle est définie par les points suivants :

Précipitation médiane 950 mm

P méd. = 950 mm	E méd. = 143 mm	Ke méd. = 15 %
P 0,98 = 630 mm	E 0,98 = 47 mm	Ke 0,98 = 7,5 %
P 0,02 = 1 340 mm	E 0,02 = 385 mm	Ke 0,02 = 28 %

On extrapole, sans trop de difficultés pour obtenir les courbes Binndé 1 000 mm et Binndé 750 mm.

Précipitation médiane 1 000 mm

P méd. = 1 000 mm	E méd. = 150 mm	Ke méd. = 15 %
P 0,98 = 690 mm	E 0,98 = 52 mm	Ke 0,98 = 7,5 %
P 0,02 = 1 390 mm	E 0,02 = 390 mm	Ke 0,02 = 28 %

Précipitation médiane 750 mm

P méd. = 750 mm	E méd. = 75 mm	Ke méd. = 10 %
P 0,98 = 460 mm	E 0,98 = 23 mm	Ke 0,98 = 5 %
P 0,02 = 1 140 mm	E 0,02 = 250 mm	Ke 0,02 = 22 %

Les courbes ont été reportées sur la figure 2.

Ces bassins sont caractérisés par une pente modérée ($I_g = 6$ m/km pour $S = 25$ km²), des sols de piémont formant glacis imperméables, des lits alluviaux contenant peu de sables. Ces bassins sont très cultivés. Le bassin de Zaptinga est à ranger dans cette catégorie.

Les bassins de Kazanga et de Louré, pour la valeur médiane de la hauteur de précipitation annuelle 920 mm, présentent un coefficient d'écoulement voisin de 20% au lieu de 15% pour Binndé. En l'absence de carte pédologique de ces bassins, il est difficile d'expliquer cette majoration de 33% de Ke. Cependant, on notera que les superficies des deux bassins sont beaucoup plus grandes que celle du bassin de Binndé et que le réseau hydrographique est en éventail. Les proportions de vertisols imperméables sont plus grandes dans les parties aval des bassins, ce qui est favorable au ruissellement, alors que la disposition du réseau hydrographique n'est pas de nature à conduire à une réduction des débits de l'amont vers l'aval. On retiendra cependant, pour ce type de bassin, la possibilité de majoration de 33% des lames d'eau écoulée avec l'augmentation des surfaces imperméables.

3.2.3.5. *Bassins-types Ouagadougou*

Ce sont les bassins voisins de cette ville. On est parti des données du Moro Naba, mais on a réduit les chiffres du ruissellement pour éliminer l'effet de l'urbanisation telle qu'elle était en 1960-1963. Pour l'isohyète 800 mm Ke médiane passe de 9% à 8%. L'exemple de Zagtoui montre qu'il ne faut pas trop réduire Ke. Pour la hauteur de précipitation annuelle 750 mm, on peut garder la même valeur de Ke médiane compte tenu des lames d'eau observées en 1963 et 1962, de ce qui a été observé à Zagtoui et enfin de la réduction sensible de P 0,05, de P médiane 800 mm à P médiane 750 mm, on peut avancer les chiffres suivants :

Précipitation médiane 750 mm

P méd. = 750 mm	E méd. = 60 mm	Ke méd. = 8 %
P 0,95 = 505 mm	E 0,95 = 20 mm	Ke 0,95 = 4 %
P 0,05 = 1 050 mm	E 0,05 = 170 mm	Ke 0,05 = 16 %

Il n'est pas impossible que E 0,05 soit un peu faible. La courbe a été reportée sur la figure 2.

Pour P médiane 1 000 mm, il est difficile d'extrapoler. L'exemple de Sélogon montre que le coefficient de ruissellement Ke médiane doit être voisin de 15%, mais on ne peut extrapoler ni vers les années sèches ni vers les années humides pour lesquelles Ke 0,95 doit être de l'ordre de 20 à 25%.

On ne peut donc indiquer qu'un seul point de la courbe :

P méd. = 1 000 mm	E méd. = 150 mm	Ke = 15 %
-------------------	-----------------	-----------

Seule la partie centrale de la courbe a été reproduite sur le graphique 2.

Ces bassins sont caractérisés par des sols argileux, mais avec pente modérée : $I_g = 6$ pour $S = 25$ km². Ils sont très cultivés.

3.2.3.6. *Bassin-type Boulsa*

Les bassins de Kogho et de Kognéré donnent des résultats concordants. La crue tout à fait exceptionnelle des bassins de Boulsa en 1962 facilite les extrapolations vers les années humides.

La hauteur de précipitation annuelle médiane sur les bassins représentatifs est de 750 mm. On peut déduire sans trop de difficultés les valeurs de E et de Ke en année sèche des observations de 1961, et les caractéristiques des trois points définissant la courbe Boulsa 750 mm.

La courbe Boulsa 1 000 mm s'en déduit par extrapolation.

Les données de base pour ces deux courbes sont les suivantes :

Précipitation médiane 1 000 mm

P méd. = 1 000 mm	E méd. = 75 mm	Ke méd. = 7,5%
P 0,95 = 750 mm	E 0,95 = 22 mm	Ke 0,95 = 3%
P 0,05 = 1 300 mm	E 0,05 = 185 mm	Ke 0,05 = 14%

Précipitation médiane 750 mm

P méd. = 750 mm	E méd. = 30 mm	Ke méd. = 4%
P 0,95 = 505 mm	E 0,95 = 7 mm	Ke 0,95 = 1,4%
P 0,05 = 1 140 mm	E 0,05 = 114 mm	Ke 0,05 = 10%

Les deux courbes ont été reproduites sur le graphique 2.

Ces bassins sont caractérisés par une pente faible $I_g = 3$ à 4 m/km pour $S = 25$ km² et par un mélange de sol perméable et imperméable (arènes et argiles).

On peut rapprocher de ces bassins ceux du type de Bidjir où la pente est nettement plus forte mais les sols perméables doivent couvrir la majeure partie de la surface.

Les données de Bazoulé sont difficiles à exploiter car on connaît mal la constitution des sols et les observations sont peu précises. Elles indiquent simplement que les bassins de Boulsa ne correspondent pas à des conditions minimales. On peut concevoir des bassins perméables et à faible pente pour lesquels Ke médiane ne dépasse pas 2% pour une hauteur de précipitation médiane de 750 mm.

3.2.4. Courbes de distribution des bassins sur grès

Les bassins sont beaucoup moins nombreux. Comparativement au Centre de la Haute-Volta, le plateau Mandingue a fait l'objet de beaucoup moins d'études. On ne peut y dénombrer que le bassin du Dounfing dont les données sont inutilisables pour l'estimation de l'écoulement annuel et le bassin du Djitiko, tous deux sur la lisière orientale. Dans ces régions tropicales sèches où le substratum est presque toujours recouvert par le sol, ce sont surtout les formations superficielles qui jouent un rôle important, malheureusement, du point de vue hydrologique il n'y a pas de classification pédologique directement utilisable. De toute façon, il est peu probable qu'on rencontre sur ce substratum des sols tels que ceux du Mayo Ligan ou de Godola, la limite supérieure du coefficient d'écoulement doit être plus faible : 17 à 18% au lieu de 28 à 30%. En utilisant les données du Djitiko, du Koumfab, des bassins de Nabapour, de Koulou et de Koumbaka (Mali), ces derniers étant situés en zone sahélienne, on a pu tant bien que mal définir deux bassins-types :

3.2.4.1. Bassin-type Djitiko

On doit faire subir une double correction aux données brutes pour parvenir à la courbe de distribution Djitiko 1 000 mm (au lieu de 1 100 mm). On réduit légèrement Ke médian pour tenir compte d'une hauteur de précipitation plus faible et on procède à une seconde correction, légère également, pour passer d'une surface de 100 km² à 25 km². On arrive ainsi à une valeur de Ke égale à 13%. Pour le bassin de Koumbaka ramené à 1 000 mm, on trouverait Ke supérieur à 18%, peut-être 20%, mais on ne doit pas oublier que Koumbaka est sous l'isohyète 570 mm, que la couverture offerte par le sol n'est pas très efficace et que la couverture végétale est nettement moins efficace que sous l'isohyète 1 000 mm. Le bassin de Nabapour présente une valeur de Ke médian égale à 11%, les grès y sont perméables. Celui de Koumfab présente un mélange de schiste, de grès et de granite, la valeur de Ke médiane = 17% trouvée pour ce bassin n'est pas très significative.

La valeur de 13% doit correspondre à une moyenne en ce qui concerne la perméabilité pour des pentes notables.

Dans ces conditions, on peut définir les courbes de distribution pour les valeurs médianes de 750 mm, 850 mm et 1 000 mm par les trois séries de trois points suivantes, compte tenu des observations sur les bassins représentatifs et des formes de courbes trouvées jusqu'ici.

Précipitation médiane 1 000 mm

P méd. = 1 000 mm	E méd. = 130 mm	Ke méd. = 13%
P 0,9 = 800 mm	E 0,9 = 76 mm	Ke 0,9 = 9,5%
P 0,1 = 1 220 mm	E 0,1 = 180 mm	Ke 0,1 = 14,7%

Précipitation médiane 850 mm

P méd. = 850 mm	E méd. = 94 mm	Ke méd. = 11%
P 0,9 = 640 mm	E 0,9 = 51 mm	Ke 0,9 = 8%
P 0,1 = 1 100 mm	E 0,1 = 135 mm	Ke 0,1 = 12%

Précipitation médiane 750 mm

P méd. = 750 mm	E méd. = 71 mm	Ke méd. = 9,5%
P 0,9 = 550 mm	E 0,9 = 33 mm	Ke 0,9 = 6%
P 0,1 = 980 mm	E 0,1 = 103 mm	Ke 0,1 = 10,5%

Ces courbes ont été reproduites sur la figure 3. Les bassins de ce type sont à pente notable avec indice de pente compris entre 4 et 10 m/km. Ils correspondent aux grès mandingues avec recouvrement latéritique pas trop exagéré.

Pour des grès plus perméables, tels que ceux du bassin de Nabapour (Togo, Fosse aux lions), il faudrait réduire ces résultats de 10 à 15%.

Pour des grès plus imperméables et toujours avec la même pente et un sol peu épais, on pourrait majorer les chiffres du Djitiko de 15 à 30% (valeur maximale).

Si la pente devient faible, le recouvrement est constitué de sols perméables assez épais, Ke diminue sérieusement et on trouve le type de bassin suivant :

3.2.4.2. *Bassin-type Banigorou (Niger)*

Ce bassin reçoit 840 mm par an (valeur médiane).

On a pu définir comme suit trois points caractéristiques de la courbe de distribution.

Précipitation médiane 850 mm

P méd. = 840 mm	E méd. = 38 mm	Ke méd. = 4,5%
P 0,8 = 700 mm	E 0,8 = 16 mm	Ke 0,8 = 2,3%
P 0,1 = 1 090 mm	E 0,1 = 87 mm	Ke 0,1 = 8%

On extrapole ces valeurs pour les isohyètes 750 mm et 1 000 mm.

Précipitation médiane 1 000 mm

P méd. = 1 000 mm	E méd. = 70 mm	Ke méd. = 7%
P 0,9 = 800 mm	E 0,9 = 30 mm	Ke 0,9 = 3,7%
P 0,1 = 1 220 mm	E 0,1 = 122 mm	Ke 0,1 = 10%

Précipitation médiane 750 mm

P méd. = 750 mm	E méd. = 22 mm	Ke méd. = 3%
P 0,9 = 550 mm	E 0,9 = 5,5 mm	Ke 0,9 = 1%
P 0,1 = 980 mm	E 0,1 = 69 mm	Ke 0,1 = 7%

Les courbes correspondantes ont été reproduites sur la figure 3.

En fait, les bassins de Koulou (Banigorou et Yoldé) présentent dans leur partie aval une zone très plate qui réduit sérieusement l'écoulement. La courbe de distribution de Yoldé serait à placer nettement en dessous de celle de Banigorou. Nous avons tenu à présenter cet exemple pour montrer qu'il existe sur grès des bassins présentant un écoulement très inférieur à celui de Djitiko. La réduction serait de 50% pour le même régime pluviométrique : P médiane = 1 000 mm.

3.2.5. *Bassins sur schistes*

Il s'agit généralement d'argiles sur schistes. Il n'a pas été possible de déduire des courbes de distribution des données existantes : les bassins de Mayo Kereng et du Bouloré sont trop petits pour extrapoler de 4 km² à 25 km², et le bassin du Koumfab est trop complexe : granite 60%, mélange de schistes et de grès imperméable 40% de la surface. Tout ce qu'on peut supposer, c'est que suivant les cas le coefficient d'écoulement à une valeur médiane qui, sous l'isohyète annuelle 900 mm, varie de 5% à 15% (cas du Mayo Kereng ou du Bouloré), mais des valeurs de 20% ne sont pas exclues si le bassin est argileux et présente de fortes pentes.

3.2.6. *Marche à suivre pour l'évaluation de l'écoulement annuel pour des bassins versants de 5 à 100 km² en régions tropicales sèches*

3.2.6.1. *Opérations à effectuer*

- 1) Déterminer la superficie du bassin versant à étudier.
- 2) Déterminer la hauteur médiane de précipitations annuelles à l'aide de la carte n° 1.

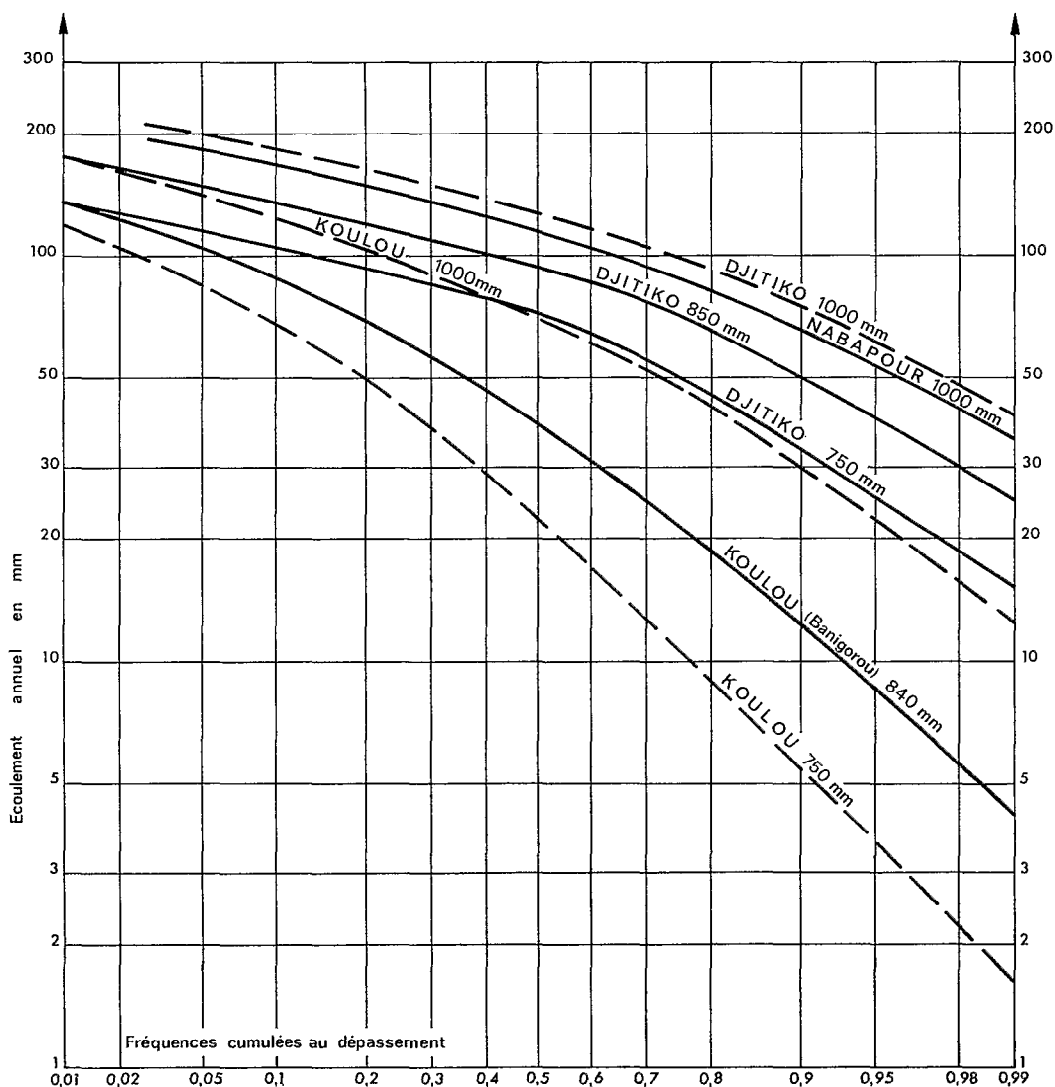


Fig. 3. — Ecoulement annuel dans la zone tropicale sèche. P = 750-1 000 mm. Distributions statistiques. Sur sol grès. Bassins de 25 km²

3) En déduire la courbe de distribution statistique des hauteurs annuelles de précipitations grâce à la figure 1. Cette opération n'est à effectuer que si l'on doit procéder à des interpolations entre deux courbes assez espacées des diagrammes 2 ou 3. Auquel cas la connaissance des précipitations annuelles des diverses fréquences, en années sèches, et le contrôle des coefficients d'écoulement correspondants peut être utile.

En général, on peut se passer de cette opération intermédiaire.

4) Etudier sur le terrain, ou à la rigueur sur photographies aériennes, les facteurs conditionnels de l'écoulement, ou certains indices permettant de les retrouver. On reviendra plus loin sur cette opération, la plus importante et la plus difficile.

Après cette quatrième opération, on essaye de classer le bassin dans une des catégories étudiées aux paragraphes 3.2.3.1 à 3.2.3.6, ou aux paragraphes 3.2.4.1 et 3.2.4.2 ou de le rattacher à un bassin-type, ou dans une position intermédiaire entre deux catégories.

5) Si le bassin versant, avec S voisin de 25 km², présente les mêmes caractéristiques qu'un des bassins-types

de référence, on trace par interpolation la courbe de distribution correspondant à la hauteur de précipitation médiane déterminée au 2), entre deux courbes du bassin-type de référence (courbes prises sur les fig. 2 ou 3).

Si l'intervalle est grand entre ces deux courbes, on pourra, pour faciliter l'interpolation graphique, partir de trois points mis en place à partir de la hauteur de précipitation médiane, de P 0,99 et de P 0,01 et de valeurs de Ke en rapport avec celles mentionnées aux paragraphes 3.2.3.1 à 3.2.3.6 ou 3.2.4.1 et 3.2.4.2.

6) Si les caractéristiques du bassin versant à étudier sont intermédiaires entre celles de deux bassins-types de la même catégorie, on tracera d'abord pour les deux bassins-types de référence les courbes de distribution correspondant à la hauteur de précipitation médiane déterminée au 2). Il sera assez facile alors de mettre en place la courbe de distribution cherchée entre les deux courbes de référence, mais sa position exacte dépendra des études faites au 4). Cette position exacte est définie par la lame d'eau écoulée pour P médiane.

7) Si le bassin versant ne fait pas partie d'une des catégories étudiées, on cherchera à le rattacher à l'une de ces catégories au moyen d'études effectuées dans le cadre de l'opération 4), études qu'on précisera au paragraphe suivant.

8) Si le bassin versant est de superficie nettement différente de 25 km², il y aura encore à extrapoler en suivant un processus semblable à celui décrit en 5). A noter que l'écoulement annuel ne décroît pas obligatoirement lorsque S croît (en particulier si la partie aval est imperméable). On trouvera une indication sur les variations du coefficient d'écoulement avec la superficie en comparant les valeurs de Ke médiane pour les bassins-types de la catégorie 5-100 km² et 100-1 000 km².

9) Si dans le bassin, très perméable dans son ensemble, une petite zone de n km², située à l'aval, est imperméable, il faudrait faire comme si on se trouvait en présence d'un bassin de n km², en négligeant le reste.

10) Etude des volumes annuels disponibles pour les différentes fréquences.

3.2.6.2. Etude des facteurs conditionnels de l'écoulement, perméabilité, pente, couverture végétale, réseau hydrographique

3.2.6.2.1. « Perméabilité globale »

Un bassin versant, même s'il fait partie d'une formation caractéristique correspond généralement à un ensemble de types de sols de propriétés très différentes. Dans chaque catégorie étudiée plus haut, chaque bassin-type correspond à des proportions déterminées des différentes formations superficielles. Il faut donc, pour le bassin dont on doit déterminer la lame d'eau écoulée, faire au moins une carte sommaire de ces diverses formations ou déterminer l'importance relative des surfaces qu'ils couvrent sur le terrain et sur photographies aériennes.

Dans tous les cas, dès qu'il y a un massif rocheux, il faut identifier les zones très diaclasées ou les zones d'éboulis, en particulier les granites décomposés en boules, qui conduisent à un écoulement faible. Si le rocher est en dalles lisses ou en dôme, il convient de vérifier si le ruissellement qui en provient n'est pas absorbé à la base par des zones d'éboulis ou des terrains perméables (arènes).

En terrain sableux, il faut rechercher les zones d'affleurements ou même les cuirasses latéritiques qui peuvent conduire à un écoulement non négligeable. On vérifie par l'examen du réseau de drainage que cet écoulement va bien jusqu'à l'exutoire.

Sur les bassins sur granite et granito-gneiss, il convient de faire l'inventaire des différents types de sols et de déterminer quel est le type d'altération des granites : décomposition en boules, éboulis ou dômes et de vérifier que l'écoulement sur les surfaces réputées imperméables : argilo-sableux ou sablo-argileux, sols hydromorphes, dômes de granite, parvient bien à l'exutoire par l'étude du réseau de drainage.

Une série d'essais Muntz sur les sols argilo-sableux ou sablo-argileux et sur les sols sableux plus ou moins profonds, même s'ils sont faits en saison sèche, pourront fournir des renseignements utiles, mais leur réalisation est plus délicate qu'on ne pourrait le croire à première vue. Sur ce type de bassin, il est nécessaire de déterminer sur photographies aériennes la densité de drainage.

Sur les bassins sur grès, il est nécessaire de vérifier quelle est la superficie occupée par des grès dénudés ou presque, qui ruissellent très bien, celle occupée par les formations latéritiques plus perméables, les régions aval couvertes de sables ou d'autres types d'alluvions dont l'aptitude à l'écoulement est variable suivant leur nature. Il faut également vérifier si le grès est en bon état ou très diaclasé. On aura ainsi une idée du choix à faire entre les bassins-types Djitiko ou Koulou. On sera peut-être amené à adopter des chiffres nettement plus faibles que ceux de Koulou, si le grès est très diaclasé ou s'il est recouvert d'un épais manteau de sol perméable sur la majeure partie de sa superficie.

Pour les bassins qui n'entrent pas dans les catégories étudiées, on peut cependant évaluer sommairement les proportions occupées par les différents types de sols, car même si leur origine n'est pas la même, ils peuvent avoir des propriétés voisines. Un éboulis de roche pourra être considéré comme perméable quel que soit le type de roche, un sol très argileux pourra être considéré comme aussi imperméable que les sols du Mayo Ligan, mais dans ce cas il faut tenir compte également de la pente.

Dans tous les cas, il faut déterminer la densité de drainage qui n'est pas suffisante pour caractériser l'ensemble perméabilité-pente, mais qui fournit une indication de plus.

3.2.6.2.2. Pente

On déterminera l'indice global de pente :

$$I_g = \frac{\Delta D}{L}$$

L : longueur du rectangle équivalent.

D : différence entre les altitudes extrêmes du bassin en laissant de côté 5% de la superficie correspondant aux cotes les plus élevées et 5% de la superficie correspondant aux cotes les plus basses, ceci pour éviter la distorsion qui résulterait de points singuliers.

Mais si un massif montagneux, très fissuré, occupe plus de 10% de la surface du bassin, il ne faudra pas en tenir compte dans le calcul. On déterminera également la pente du cours d'eau principal sur au moins la moitié aval de sa longueur.

3.2.6.2.3. Couverture végétale et utilisation du sol

On déterminera le pourcentage de la superficie cultivée. Même avec les pratiques ancestrales de cultures en terrasse, les sols très cultivés, comme ceux de Godola, du Moro Naba, ruissellent beaucoup plus que ceux qui ont conservé, à peu près leur couverture végétale naturelle.

3.2.6.2.4. Réseau hydrographique

On a vu que dans tous les cas, il fallait estimer la densité de drainage. En plus, il faut examiner la nature du lit, voir si les berges sont franches, quelle peut être la section mouillée moyenne pour la crue annuelle dont souvent le niveau peut être repéré sans trop de difficultés en recherchant les délaissés de crues récentes (sauf si notoirement l'année précédente a été exceptionnelle).

L'idéal serait de disposer d'équation de régression entre débit de crue moyenne annuelle et volume moyen annuel écoulé, d'une part, et entre géomorphologie du lit et ce débit de crue moyenne annuelle, d'autre part. De telles régressions peuvent être utilisées mais sur de plus grands cours d'eau, pour 25 km² on aurait beaucoup plus de difficultés à faire abstraction de singularités locales. De toute façon, toutes ces régressions varient avec le type de bassin, mais il y a là une voie à explorer pour l'avenir et un réseau très bien marqué avec des lits à section mouillée de notable surface est le signe d'une bonne aptitude à l'écoulement.

3.2.6.2.5. Réalisation de cette étude

La meilleure solution consisterait à examiner à la fois le terrain et la photographie aérienne, mais ce n'est pas toujours possible. De toute façon, il faut au moins étudier les photographies aériennes pour distinguer les glacis des zones rocheuses et des zones de cultures, évaluer la densité de drainage etc.

Mais de toute façon, le classement d'un bassin dans une des catégories-types décrites rapidement en 3.2.3 et 3.2.4 sera souvent difficile. Retenons que les cas où Ke médian est supérieur à 15-18% ne sont pas très fréquents, sauf dans des zones très cultivées avec pentes assez fortes et glacis imperméables couvrant une partie notable du bassin.

3.3. BASSINS VERSANTS DE 100 A 1 000 KM²

Il devient plus délicat de donner des règles générales. Dans bien des cas (données de stations de réseau par exemple) on ne connaît pas toujours la hauteur de précipitation moyenne sur le bassin pour les diverses années d'observation.

On pourra, pour les années observées, retrouver la fréquence de l'écoulement annuel dans le cas d'ensembles de bassins représentatifs, mais on procédera avec précaution, en particulier, on devra vérifier que la répartition des averses au cours de la saison des pluies est bien la même et que la hauteur de précipitation moyenne sur le plus grand bassin est la même que sur les petits. Pour les stations du réseau, on pourra esquisser directement des courbes de distribution des écoulements en s'inspirant de la forme de distribution des écoulements en s'inspirant de la forme des courbes trouvées sur les bassins de 25 km² ou des courbes obtenues pour les séries les plus longues du réseau hydrométrique.

3.3.1. Informations disponibles

Ces informations proviennent des données de bassins représentatifs, d'études régionales et, pour un très petit nombre de stations du réseau. On présentera les données disponibles suivant cet ordre et on considérera des hauteurs pluviométriques annuelles décroissantes.

3.3.1.1. Bassins représentatifs

	<i>Dd</i>	<i>Ig</i>	<i>Année</i>	<i>P</i> (mm)	<i>E</i> (mm)	<i>Ke</i> (%)
BASSIN DE BOULSA (Haute-Volta)						
<i>Koulouoko à Niegba</i> , S = 1 010 km ² , surtout granite	1,10	1,53	1960	méd. 750 650	15,6	2,4
			1961	(840)	29,7	3,5
			1962	(1 150)	105,5	9,2
					méd. 30	4
<i>Donse</i> (Haute-Volta) S = 182 km ² , granite	(1,3)		1961	méd. 825 (770)	93	12,1
			1962	(790)	52	6,6
			1963	570	5,6	0,96
<i>Kamboensé</i> (Haute-Volta) S = 137 km ² , granite	0,51		1961	méd. 825 (780)	37,4	4,8
			1962	900	29	3,2
			1963	750	4,1	0,55
BASSINS DU BAM BAM (Tchad)						
<i>Taya</i> (Guéra-Tchad) S = 167 km ² , granite	(2,85)	6,5	1963	méd. 850 631	0,6	≠ 0
			1964	1 078	72	6,7
			1965	800	3,6	0,4
			1966	726	4,0	0,54
<i>Mazéra</i> (Guéra-Tchad) S = 316 km ² , granite	(3,3)	4,3	1963	méd. 835 647	1,7	0,27
			1964	875	92	10,6
			1965	778		
			1966	705	10,6	1,5
<i>Barlo V</i> (Guéra-Tchad) S = 528 km ²	(3,1)	3,5	1963	méd. 835 680	9,9	1,56
			1964	1 025		
			1965	735		
			1966	724	19,9	2,6
<i>Bam Bam à Tialo Zoudou</i> , S = 1 200 km ²				(voir § 3.4.1.1.)		
BASSINS DE OUAGADOUGOU (Haute-Volta)						
<i>Ouagadougou III</i> S = 352 km ² , granites, migmatites	0,59	2,52	1956	méd. 850 ?	27	
			1957	?	12,8	
			1958	?	11,3	
			1959	?	22,2	
			1960	?	28,9	
			1961	810	40	(5)
			1962	950	79	(8,3)
			1963	670	5,1	(0,76)
<i>Ouagadougou I</i> S = 294 km ² , granite, migmatite	0,56	3,04	1961	méd. 850 (835)	58	(7,2)
			1962	(850)	97,8	(10,8)
			1963	(680)	13,4	(1,9)

	<i>Dd</i>	<i>Ig</i>	<i>Année</i>	<i>P</i> (<i>mm</i>)	<i>E</i> (<i>mm</i>)	<i>Ke</i> (%)
<i>Nabagalé</i>				méd. 875-900		
S = 470 km ² , granites	(0,94)	(1,31)	1961	(820)	61	(7,4)
			1962	(1 070)	107	(10)
			1963	(660)	21,7	(3,3)
<i>Boulbi</i>				méd. 875-900		
S = 125 km ² , granite	(0,87)		1961	(830)	55	(6,6)
			1962	(1 050)	81	(7,7)
			1963	(670)	65	(9,7)
MANGA (Haute-Volta)				méd. 920		
<i>Niarba</i> , S = 572 km ² , granite 80%, roches basiques 20%	(2,03)	(2,5)	1963	(860)	105	(12,2)
			1964	(855)	156	(18,3)
			1965	(770)	72,3	(9,4)
<i>Koulougouna (Togo - Fosse aux lions)</i>				méd. 1 070		
S = 189 km ² , granite 35%, schistes 35% et grès 30%	0,82	6,03	1959	(967)	(121)	(12,5)
			1960	892	(97)	10,9
			1961	863	158	18,4

3.3.1.2. *Etudes régionales*

	<i>Année</i>	<i>P</i> (<i>mm</i>)	<i>E</i> (<i>mm</i>)	<i>Ke</i> (%)
<i>Barraro (Mali)</i>		méd. 1 100		
S = 251 km ² , grès	1968	(890)	67,5	7,6
	1969	(970)	62,5	6,4
	En année médiane E évalué à 88 mm			
	En année décennale E évalué à 60 mm			
<i>Kiffa à Sokorani (Mali)</i>		méd. 1 100		
S = 740 km ² , grès, sols ferrugineux tropicaux, alluvions	1958	(1 050)	70	7,3
	1959	(915)	13	1,4
	En année médiane E est évalué à 44,5 mm			
	En année décennale humide E est évalué à 77 mm			
	En année décennale sèche E est évalué à 12 mm			

3.3.1.3. *Stations du réseau*

<i>Tsanaga à Maroua (Cameroun)</i>		méd. 930		
S = 845 km ²	1954	935	273	29,2
	1966	856	196	23
	1967	957	282	29
	1968	885	246	28
	1969	1 075	219	20
	1970	854	204	24
(Voir Tsanaga à Bogo, § 3.4.2.1. pour les années ultérieures)				
<i>Kalliao à Maroua (Cameroun)</i>		méd. 850		
S = 355 km ²	1954	863	308	35,7
	1955	955	244	25,6
	1966	703	117	15
	1967	735	205	28
	1968	840	118	14
	1969	960	145	15
	1970	730	153	21

3.3.2. Courbes de distribution de l'écoulement des bassins sur granite et granito-gneiss

On ne doit pas perdre de vue que pour des bassins de cette superficie, la distribution de la hauteur de précipitation annuelle moyenne sur le bassin est légèrement différente de la même distribution pour une valeur ponctuelle. Par exemple, pour les années humides, la hauteur centennale sur 500 km² est inférieure à la hauteur centennale en un point pour la même valeur médiane de la hauteur de précipitations annuelles. Il y a un coefficient d'abattement beaucoup plus proche de 1 que lorsque l'on étudie les hauteurs de précipitations journalières. Mais pour des bassins de cette surface, cet abattement n'est pas négligeable. On observe le même phénomène pour les années sèches avec cette différence que pour une surface de 500 km² par exemple, l'année centennale sèche correspond à une hauteur de précipitation légèrement plus forte qu'en un point. En conséquence, sauf pour les valeurs médianes, les valeurs de K_e 0,9 ou K_e 0,1 que nous donnerons sont simplement les coefficients à utiliser pour passer des courbes de la figure 1 aux courbes de distribution de l'écoulement, ce ne sont pas les véritables valeurs du coefficient d'écoulement, lesquelles sont plus faibles pour la fréquence décennale sèche et plus fortes pour la fréquence décennale humide que les valeurs K 0,9 et K 0,1, que nous donnons dans ce qui suit.

Nous reprendrons autant que possible les mêmes types de bassins que pour les superficies 5-100 km².

Nous n'avons pas d'exemple de bassin-type Mayo Ligan pour cette catégorie et il n'est pas impossible qu'il n'en existe pas. Cependant, on trouvera peut-être des bassins de catégories intermédiaires entre le type Mayo Ligan et le type Godola.

3.3.2.1. Bassin-type Tsanaga (voir bassin-type Godola au point 3.2.3.2)

Pour les deux bassins de la Tsanaga et du Kalliao, on a défini E médiane E 0,1 et E 0,9 en étudiant à la fois les séries d'écoulement observées sur ces bassins, la série de leur somme et la série des écoulements à l'aval de Bogo (voir § 3.4).

Pour cette station, le débit en année sèche (1971-1972 et 1973), est à peine supérieur au débit de la somme Kalliao + Tsanaga à Maroua. En année moyenne ou humide, c'est le contraire, il y a déjà de sérieuses pertes entre Maroua et Bogo.

On arrive ainsi aux résultats suivants :

Tsanaga à Maroua. Précipitation en année médiane : 930 mm ; $S = 845$ km².

P méd. = 930 mm	E méd. = 220 mm	K_e méd. = 23,5 %
(P 0,9 = 730 mm)	E 0,9 = 120 mm	(K_e 0,9 = 16,5 %)
(P 0,1 = 1 160 mm)	E 0,1 = 300 mm	(K_e 0,1 = 26 %)

La courbe a été reproduite sur la figure 4.

C'est un bassin de montagne avec vallée principale à forte pente à l'amont puis à pente beaucoup plus faible à l'aval, il y a des pertes dans le lit majeur en année humide, d'où une valeur de K_e 0,1 voisine de K_e médian. On notera qu'à précipitation médiane égale K_e médian présente un écart de 1 point avec K_e médiane Godola, K_e médian varie peu avec la superficie.

Kalliao à Maroua. Précipitation en année médiane : 850 mm ; $S = 355$ km².

P méd. = 850 mm	E méd. = 160 mm	$K_e = 18,8\%$
(P 0,9 = 640 mm)	E 0,9 = 90 mm	($K_e \neq 14\%$)
(P 0,1 = 1 100 mm)	E 0,1 = 260 mm	($K_e = 24\%$)

La courbe a été reproduite sur la figure 4.

Il n'y a pratiquement pas de dégradation hydrographique à l'aval. L'écart entre les écoulements du Kalliao et de la Tsanaga est dû en grande partie à la différence de hauteur de précipitation médiane (plus de 100 mm). L'écart relatif tend à diminuer en année humide car le Kalliao ne présente pratiquement pas de pertes en années décennales humides.

On a jugé imprudent de tracer un réseau de courbes pour les précipitations annuelles médianes comprises entre 750 et 1 000 mm.

On peut prendre ces courbes comme base pour les bassins de montagne du Nord Cameroun avant l'arrivée dans la Cuvette tchadienne ou le fossé de la Bénoué où se produit une certaine dégradation. Il n'est pas impossible que ces courbes puissent être également utilisées pour certaines rivières qui descendent du plateau de Jos au Nigéria, mais, en général, il semble qu'elles s'apparenteraient plutôt aux cours d'eau du massif du Guéra, au Tchad, où les terrains sont en moyenne beaucoup plus perméables et la dégradation assez rapide vers l'aval.

3.3.2.2. Bassin-type Manga (Haute-Volta) (voir bassin-type Binndé au § 3.2.2.)

Niarba. Précipitations en année médiane : 920 mm ; $S = 572$ km².

Il semble qu'on puisse prendre pour la valeur médiane de l'écoulement 160 mm. On peut tant bien que mal avancer des chiffres pour les valeurs décennales sèches et humides.

La courbe de distribution de l'écoulement serait définie par les points suivants :

P méd. = 920 mm	E méd. = 150 mm	Ke méd. = 16,3%
(P 0,9 = 720 mm)	E 0,9 = 70 mm	(Ke 0,9 = 10 %)
(P 0,1 = 1 290 mm)	E 0,1 = 220 mm	(Ke 0,1 = 17 %)

La courbe a été reproduite sur la figure 4.

Comme nous l'avons déjà observé, on trouve pour Ke médian des valeurs supérieures à celles de certains bassins versants du même type dans la catégorie 5-25 km².

La partie aval de ces bassins, où la couverture végétale est dégradée, est couverte de vertisols argileux qui présentent une pente notable avec un réseau hydrographique bien net. On retrouve bien des vertisols dans le Guéra (Tchad), mais ils sont dans une zone très plate et uniquement dans le lit majeur, ils ont donc beaucoup moins d'influence que sur le bassin de Manga.

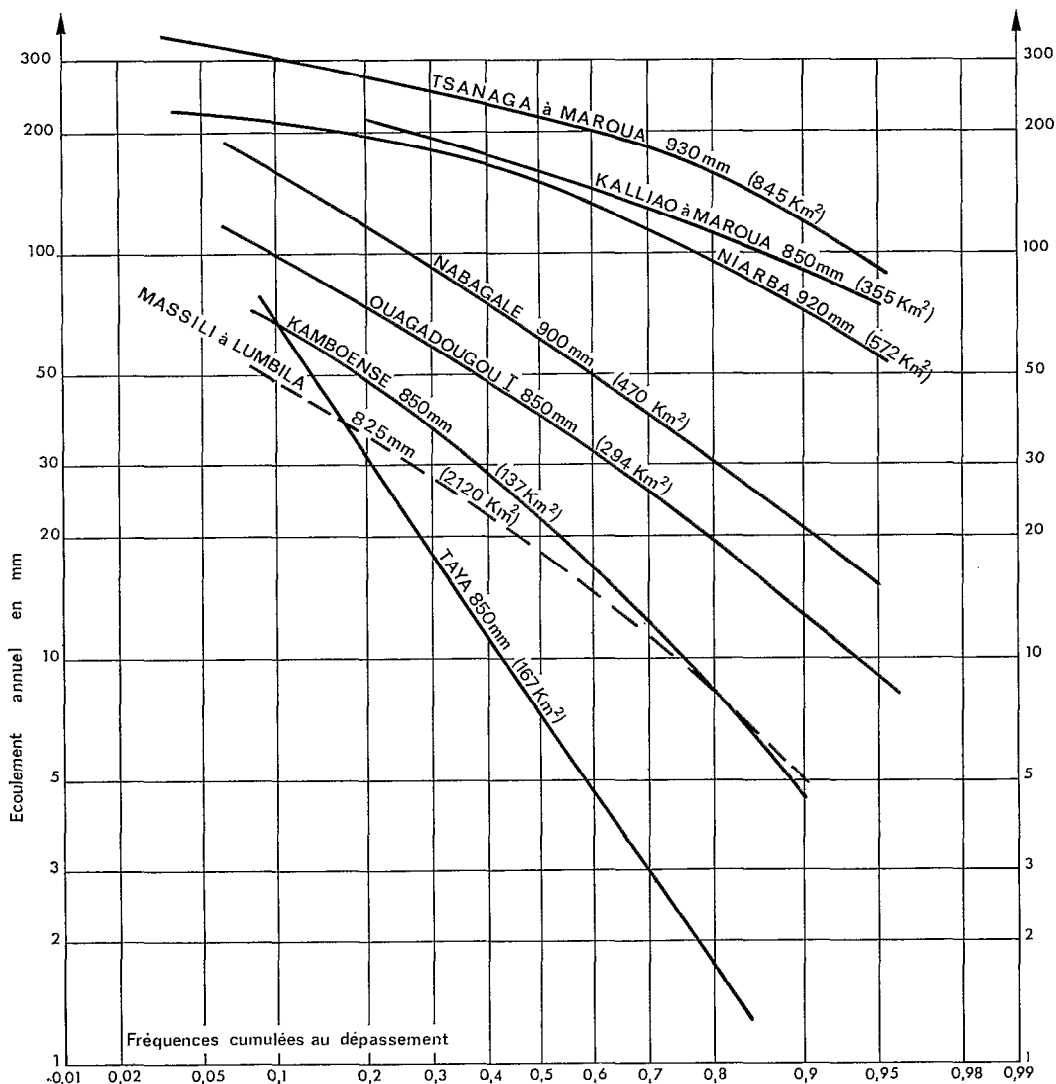


Fig. 4. — Ecoulement annuel dans la zone tropicale sèche. P = 750-1 000 mm. Distributions statistiques. Sur sol granite et granito-gneiss. Bassins de 100 à 1 000 km²

3.3.2.3. Bassin-type Nabagalé (Haute-Volta) (à rapprocher du bassin de Selogen point 3.2.3.5)

Précipitation en année médiane : 900 mm ; S = 470 km².

Là aussi la détermination de E médian, E 0,9, E 0,15 est délicate.

On propose les chiffres suivants :

P méd. = 900 mm	E méd. = 60 mm	Ke méd. = 6,7%
(P 0,9 = 690 mm)	E 0,9 = 21 mm	(Ke 0,9 = 3,1%)
(P 0,15 = 1 100 mm)	E 0,15 = 108 mm	(Ke 0,15 ≠ 10 %)

La courbe a été reproduite sur la figure 4.

Ces bassins rappellent ceux de Manga, mais la pente est beaucoup plus faible, d'où une valeur de Ke très inférieure, les bassins de Boulbi et de Donsé leur sont très comparables.

3.3.2.4. Bassin-type Ouagadougou, Kamboensé et Boulsa (Haute-Volta)

On a choisi le bassin de Ouagadougou I où le régime est moins perturbé pour établir la courbe de distribution. L'examen de la série de Ouagadougou III montre que l'écoulement médian est nettement inférieur à celui de 1961 : on adoptera 40 mm.

La courbe peut être définie par les trois points suivants (S = 294 km² ; Précipitation en année médiane : 850 mm).

P méd. = 850 mm	E méd. = 40 mm	Ke méd. = 4,7%
(P 0,9 = 640 mm)	E 0,9 = 13 mm	(Ke 0,9 = 2 %)
(P 0,1 = 1 100 mm)	E 0,1 = 99 mm	(Ke 0,1 = 9 %)

Les bassins peu perméables sont très plats, tout au moins à cette échelle de 100-1 000 km², le coefficient de ruissellement baisse très nettement lorsqu'on passe de 25 km² à 500 par exemple.

Si le bassin est très plat, très allongé comme celui de Kamboensé, on arrive aux chiffres suivants (S = 137 km² ; précipitation en année médiane : 850 mm) :

P méd. = 850 mm	E méd. = 22 mm	Ke méd. = 2,6%
(P 0,9 = 650 mm)	E 0,9 = 4,5 mm	(Ke 0,9 = 0,7%)
(P 0,2 = 1 000 mm)	E 0,2 = 48 mm	(Ke 0,2 = 4,3%)

Les deux courbes ont été reproduites sur la figure 4.

Ces chiffres sont à rapprocher de ceux obtenus sur le grand bassin de Boulsa : le Koulouoko à Niegaha, dont la courbe de distribution peut être esquissée à partir des trois points suivants (S = 1 010 km² ; précipitation en année médiane : 775 mm) :

P méd. = 775 mm	E méd. = 30 mm	Ke méd. = 3,9%
P 0,90 = 580 mm	E 0,9 = 14 mm	Ke 0,9 = 2,4%
P 0,01 = 1 220 mm	E 0,01 = 110 mm	Ke 0,01 = 9 %

Ces chiffres sont très voisins de ceux trouvés pour des bassins du même type dans la catégorie 5-100 km².

3.3.2.5. Bassin-type Bam Bam (Guéra-Tchad)

La variabilité du coefficient d'écoulement, Ke médian d'un bassin à un autre toujours faible est telle qu'il est difficile d'arriver à des chiffres sûrs.

Il semble que pour le bassin de Taya, on puisse avancer les trois chiffres suivants (précipitation en année médiane : 850 mm) :

P méd. = 850 mm	E méd. = 7 mm	Ke = 0,8%
P 0,85 = 675 mm	E 0,85 = 1,3 mm	Ke = 0,2%
P 0,10 = 1 100 mm	E 0,10 = 68 mm	Ke = 6,2%

La courbe a été reproduite sur la figure 4.

Malheureusement, le bassin de Taya n'est pas le plus représentatif. L'examen des résultats de Mazera, de Barlo V et surtout du Bam Bam (voir 3.4) montre qu'on peut compter pour ces bassins sur des valeurs médianes de l'écoulement voisines de 20 à 30 mm. Ce qui correspondrait à une valeur de Ke médian égale à 3 à 4%. Ke 0,9 = 0,5 à 1%.

Malgré des crues assez violentes, ces bassins présentent un coefficient d'écoulement faible, nettement inférieur à celui des bassins du même type de 5-100 km², ce coefficient doit augmenter nettement quand la précipitation médiane croît.

Les bassins, très cultivés, présentent à l'amont une assez forte pente, mais la proportion de sols perméables

(granites décomposés en boules et arènes), à l'amont, est forte. A l'aval on rencontre des sols hydromorphes argileux mais la pente est alors très faible et les pertes y sont très importantes, même en année médiane.

3.3.3. Courbes de distribution de l'écoulement de bassins sur grès

Comme pour les bassins de 5 à 100 km², notre information est beaucoup moins riche que pour les zones granitiques. Nous ne pourrions donner que quelques points de repère mais, malheureusement, les renseignements dont nous disposons sur le sol recouvrant les grès sont beaucoup trop fragmentaires.

3.3.3.1. Bassin-type Koulougouna (Fosse aux lions, Togo)

On a vu en 3.2.4.1 que certains bassins de la Fosse aux lions avaient un meilleur écoulement que ceux du type Djitiko et d'autres un écoulement plus faible. Celui de Koulougouna correspond au premier cas. On a réduit légèrement les chiffres obtenus sur le bassin pour tenir compte du passage de 1 070 mm précipitation médiane sur le bassin à 1 000 mm.

Les chiffres suivants paraissent vraisemblables (S = 189 km² ; précipitations en année médiane : 1 000 mm) :

P méd. = 1 000 mm	E méd. = 116 mm	Ke méd. = 11,5%
(P 0,98 = 690 mm)	E 0,98 = 40 mm	(Ke 0,98 = 5,8%)
(P 0,8 = 860 mm)	E 0,8 = 84 mm	(Ke 0,8 = 9,7%)

Ces bassins sont à pente assez forte, ils comportent des grès imperméables, la vallée principale est assez perméable. Le coefficient de ruissellement passe de 13-15% pour des bassins de 5 à 100 km² à 11,5% pour 200 km².

3.3.3.2. Bassin-type Barraro (Mali)

C'est le rebord est du plateau Mandingue.

L'interprétation des deux campagnes de mesures conduit aux données suivantes, en ramenant les résultats à l'isohyète 1 000 mm (S = 251 km² ; précipitation médiane : 1 000 mm) :

P méd. = 1 000 mm	E méd. = 70 mm	Ke méd. = 7 %
(P 0,9 = 800 mm)	E 0,9 = 40 mm	(Ke 0,9 = 5 %)
(P 0,1 = 1 220 mm)	E 0,1 = 105 mm	(Ke 0,1 = 8,6%)

Les pentes moyennes sont nettement plus faibles que sur le Djitiko, la valeur de Ke médian est réduite de 13% à 7%.

La courbe correspondante a été reportée sur la figure 5.

3.3.3.3. Bassin-type Kiffa (Banifing de San, Mali)

Le bassin étudié reçoit 1 100 mm en année médiane. Au cours de l'étude dont il a fait l'objet, on avait évalué l'écoulement annuel en année moyenne, en année décennale sèche et en année humide.

Les chiffres ont été corrigés pour passer de 1 100 mm à 1 000 mm en gardant des coefficients d'écoulement très voisins (S = 740 km² ; précipitation en année médiane : 1 000 mm) :

P méd. = 1 000 mm	E méd. = 40 mm	Ke méd. = 4 %
P 0,9 = 800 mm	E 0,9 = 10 mm	Ke 0,9 = 1,2%
P 0,1 = 1 220 mm	E 0,1 = 75 mm	Ke 0,1 = 6,1%

Il s'agit de bassins à pente assez faible à recouvrement de formations latéritiques perméables.

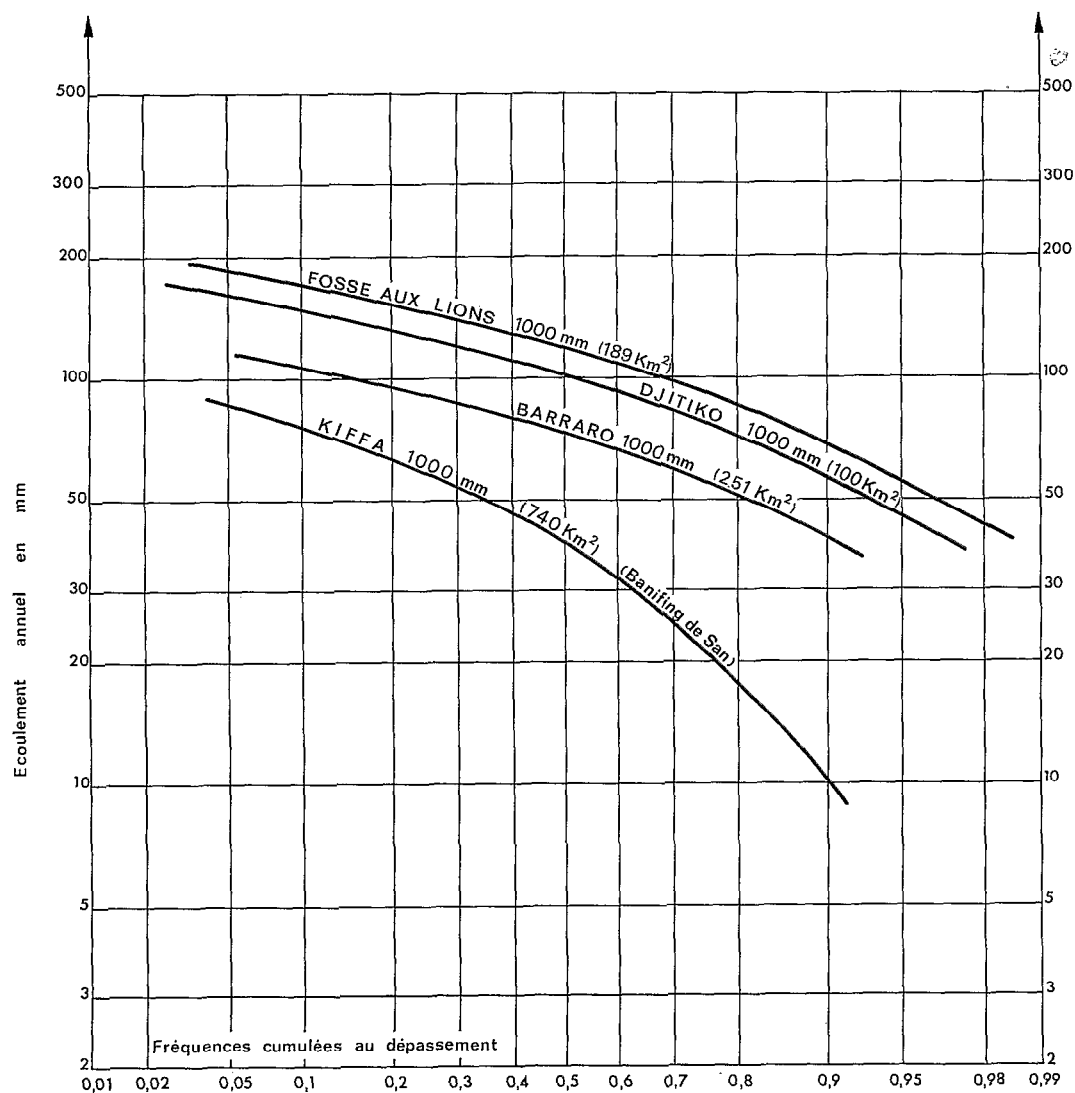
Il y a certainement des bassins sur grès qui fournissent un écoulement annuel plus faible que la Kiffa.

3.3.4. Bassins sur schistes

Nous n'avons aucune donnée, le bassin de Koulougouna ne comporte que 30% de formations schisteuses et il est impossible d'en tirer quoi que ce soit tout au moins pour ce genre de substratum.

3.3.5. Bassins sur formations sédimentaires récentes

D'après l'exemple de la Kabia (Tchad) sur les sables de Kélo que l'on verra au point 3.4 et celui des bassins représentatifs de Badé sur la même formation mais avec une hauteur pluviométrique annuelle de 1 200 mm, il ne semble pas que l'écoulement annuel pour des bassins de cette catégorie 100 km² - 1 000 km² dépasse 60 mm pour une hauteur de précipitation annuelle de 1 000 mm : Ke médian = 6%, lorsque la pente est notable. Quand la pente est très faible, comme sur la Kabia, Ke médian tombe peut-être à 3% toujours pour l'isohyète 1 000 mm.



Nota : Fosse aux lions : 1/3 grès, 1/3 schiste, 1/3 granite

Fig. 5. — Ecoulement annuel dans la zone tropicale sèche. P = 750-1 000 mm. Distributions statistiques. Sur sol grès. Bassins de 100 à 1 000 km²

Les formations argileuses conduisent certainement à des écoulements plus élevés lorsque le réseau de drainage y est bien organisé, ce qui n'est pas très souvent le cas.

3.3.6. Conclusions

Il est beaucoup plus difficile de transposer les résultats d'un bassin à un autre que dans la catégorie de superficie précédente et il reste de nombreuses lacunes. On peut, pour l'estimation des écoulements annuels, suivre le même processus qu'au paragraphe 3.2.6, l'examen du terrain et en particulier du réseau hydrographique est au moins aussi important.

3.4. BASSINS VERSANTS DE SUPERFICIE SUPÉRIEURE A 1 000 km²

Les bassins sont beaucoup moins homogènes, tant en ce qui concerne le régime des précipitations que la constitution géologique. On ne cherchera donc plus à les classer d'après ce caractère géologique. Il devient pratiquement impossible de déterminer, pour les années d'observation, la hauteur de précipitation annuelle, la notion de Ke est donc beaucoup moins utile, il ne reste que deux bassins représentatifs : ceux du Bam Bam et de Boulsa (Koulouoko) pour lesquels cette opération est possible. On n'a pas inclus, dans cette catégorie, les grands bassins de cours d'eau qui viennent du Sud et dont le régime ne correspond pas aux régions tropicales sèches.

3.4.1. Information disponible

Elle provient presque exclusivement des réseaux hydrométriques. Il n'y a que deux bassins représentatifs : ceux de Boulsa et celui du Bam Bam, et deux études régionales, celle du Banifing de San et celle du Dallol Maouri.

	<i>Dd</i>	<i>Ig</i>	<i>Année</i>	<i>P</i> (mm)	<i>E</i> (mm)	<i>Ke</i> (%)
<i>Le Koulouoko à Niégha</i> (Boulsa-Haute-Volta), S = 1 010 km ²	1,10	(1,53)	1960 1961 1962	méd. 775 (650) (840) (1 150)	15,6 29,7 105,5 méd. 30	2,4 3,5 9,2 3,9
<i>Le Bam Bam à Tialozoudou</i> (Guéra-Tchad), S = 1 200 km ²	3,20	3,4	1958 1959 1960 1961 1962 1963 1964 1965 1966	méd. 800-835 720-750 690 995 716 723	> E 1964 ? 75 33 > E 1959 < E 1959 8,7 92,9 8,1 14,1	≠ 10 1,3 9,3 1,1 1,9
<i>Le Dallol Maouri à Bengou (Niger)</i> S = 2 800 km ²			1968 1969 1970 1971 1972	méd. 750-800	0,9 5 0,35 1,6 0,002	
			Année médiane	E = 1 mm		
			Année décennale sèche	E = 0,2 mm		
<i>Le Banifing de San à Pinea (Mali)</i> S = 2 960 km ²			1958 1959	méd. 1 000 1 050 822	(45) (12)	4,3 1,45
			Evaluation année médiane	E = 29 mm		
			année décennale sèche	E = 11 mm		
			année décennale humide	E = 46 mm		

	Année	E (mm)	Année	E (mm)	Année	E (mm)
<i>La Sirba à Garbey Kourou</i> (Niger, Haute-Volta) S = 38 750 km ²			P méd. 700-750			
	1956	25,1	1964	26,9	1969	13,8
	1957	3,8	1965	32,2	1970	8,12
	1958	62,6	1966	5,53	1971	11,3
	1962	28,1	1967	34,7	1972	4,85
	1963	4,65	1968	2,16	1973	19
<i>Le Goroubi à Diangoré (Niger)</i> S = 15 300 km ²			P méd. 750			
	1960	8	1965	9,35	1970	16,1
	1961	> 20	1966	9,08	1971	12,8
	1962	26,5	1967	21,8	1972	((4,5))
	1963	8,22	1968	2,3	1973	17,7
	1964	28,6	1969	13,5		
<i>Le Diamangou à Tamou (Niger)</i> S = 4 030 km ²			P méd. 780			
	1960	(7)	1965	7,9	1970	35,2
	1961	(22)	1966	22,8	1971	54,9
	1962	(40)	1967	20,9	1972	3,92
	1963	14,4	1968	3,5	1973	32,8
	1964	54,6	1969	18,3		
<i>Le Goulbi de Maradi à Nielloua</i> (Nigéria-Niger) S = 4 800 km ²			P méd. 775-800			
	1957	10,3	1964	27	1970	55,8
	1958	23,7 ?	1965	20,6	1971	39,4
	1959	> 18,7	1966	17,3	1972	20,6
	1961	90	1967	53,5	1973	27
	1962	24,2	1968	12,3		
	1963	35,4	1969	17,5		
<i>La Tapoa (Niger)</i> S = 5 330 km ²			P méd. 800			
	1960	5	1965	3,4	1970	13,1
	1961	12	1966	2,3	1971	8
	1962	14	1967	6,3	1972	4,6
	1963	1,7	1968	1,8	1973	12,3
	1964	16,4	1969	4,4		
<i>La Massili à Loumbila</i> (Haute-Volta) S = 2 120 km ²			P méd. 825			
	1956	11,3	1963	3,3	1970	18,9
	1957	4,7	1964	4,8	1971	24,0
	1958	32	1965	18,4	1972	7,1
	1959	21,7	1966	4,7	1973	6,1
	1960	21,7	1967	36,5	1974	> 48
	1961	48	1968	7,15		
	1962	22	1969	12,5		
	Année	P (mm)	E (mm)	Ke (%)		
<i>La Tsanaga à Bogo (Cameroun)</i> S = 1 535 km ²		méd. 855				
	1953	830	50	6		
	1954	910	182	20		
	1955	991	208	21		
	1966	828	143	17		
	1967	836	208	25		
	1968	823	166	20		
	1969	984	183	18		
	1970	793	184	23		
	1971		95			
	1972	850 ?	≥ 102			
	1973		102			

	Année	E (mm)	Année	E (mm)	Année	E (mm)
<i>La Volta rouge à Sakoinzé</i> S = 1 210 km ²			P méd. 850-900			
	1968	22,7	1970	16,1		
	1969	29,1	1971	11,1		
<i>La Volta blanche à Yakala</i> S = 33 000 km ²			P méd. 950 à la station			
	1956	48,7	1962	47,1	1969	32
	1958	46,1	1963	(21,5)	1970	29,1
	1959	45,3	1966	((14))	1972	16,5
	1960	19,7	1967	((40))	1973	26,8
	1961	50,7	1968	11,9		
<i>La Kabia à Gounou Gaya</i> S = 3 840 km ² Sables de Kélo (Continental terminal tertiaire) et alluvions quaternaires			P méd. 1 040			
	1951	9,6	1962	14,2	1968	((16))
	1955	((18,6))	1963	((13,2))	1969	((50))
	1956	30,1	1964	26,8	1970	((50))
	1957	8,6	1965	10,4	1971	((8,8))
	1958	8,8	1966	((30,1))	1972	((10))
	1961	17,4	1967	((20))		
<i>Le Bahr Salamat à Tarangara</i> (Tchad) S = 135 000 km ²			P méd. 660			
	1955	7,90	1962	6,99	1968	3,1
	1957	2,69	1963	7,95	1969	2,1
	1958	3,11	1964	7,27	1970	1,9
	1959	2,46	1965	< 1,6	1971	2,4
	1960	3,27	1966	1,6		
1961	5,14	1967	4			
<i>Le Bahr Aouk à Golongosso</i> (Tchad-ECA) S = 96 000 km ²			P méd. 970			
	1952	28,8	1959	29	1966	20,1
	1954	27,2	1960	24,1	1967	21,8
	1955	38,8	1961	16,7	1968	18,3
	1956	29,8	1962	39,1	1969	20,3
	1957	21,6	1963	37,1	1971	26,4
1958	22,9	1965	16,1			

3.4.2. Distribution statistique de l'écoulement moyen annuel pour des bassins de superficie supérieure à 1 000 km²

On doit faire ici la même réserve que pour les bassins de 100 à 1 000 km² en ce qui concerne la différence entre les courbes de distribution des précipitations annuelles en un point et sur la surface du bassin ; d'ailleurs on connaît trop mal en général les hauteurs de précipitations annuelles moyennes successives pour que l'on puisse les utiliser, sauf dans le cas de bassins représentatifs. On ne donnera donc le plus souvent que la valeur médiane du coefficient d'écoulement.

On donnera ci-après les valeurs de base de l'écoulement pour trois fréquences cumulées en suivant non plus un ordre de classement s'inspirant du substratum géologique et de l'aptitude au ruissellement, mais l'ordre géographique en commençant par l'Est.

3.4.2.1. Bahr Aouk (Tchad)

S = 96 000 km².

La précipitation moyenne sur le bassin est en année médiane de l'ordre de 970 mm, sans grande signification.

E 0,9 = 17,5 mm

E méd. = 25 mm

E 0,1 = 36 mm

Ke méd. = 2,6%

Les tributaires viennent de massifs cristallins qui reçoivent plus de 1 000 mm, mais ils arrivent très vite dans le collecteur qui est situé en pleine cuvette tchadienne très plate où les pertes par évaporation sont considérables.

La courbe représentative est reportée sur la figure 7.

3.4.2.2. Bahr Salamat (Tchad)

$S = 135\ 000\ \text{km}^2$.

La hauteur de précipitation moyenne sur le bassin, en année médiane, n'a aucune signification.

$E\ 0,9 = 1,5\ \text{mm}$ $E\ \text{méd.} = 3,10\ \text{mm}$ $E\ 0,1 = 7,5\ \text{mm}$

Théoriquement, le Bahr Salamat prend sa source dans le Djebel Marra et prend le nom de Bahr Azoum lorsqu'il est devenu assez puissant, mais le Bahr Azoum se perd presque en totalité dans la cuvette tchadienne à l'amont et à l'aval d'Am Timan et les apports qui passent à la station de Tarangara avant de rejoindre le Chari proviennent du Bahr de Koro alimenté par la partie sud-est du massif du Guera et par le drainage de la partie sud-ouest des plaines du Salamat.

La courbe représentative a été reportée sur la figure 7.

3.4.2.3. Le Bam Bam à Tialo Zoudou (Guera, Tchad)

$S = 1\ 200\ \text{km}^2$; précipitation annuelle en année médiane : 800-835 mm.

$P\ \text{méd.} = 800\ \text{mm}$	$E\ \text{méd.} = 24\ \text{mm}$	$Ke\ \text{méd.} = 3\ \%$
$(P\ 0,9 = 600\ \text{mm})$	$E\ 0,9 = 6,5\ \text{mm}$	$(Ke\ 0,9 = 1,1\ \%)$
$(P\ 0,1 = 1\ 030\ \text{mm})$	$E\ 0,1 = 90\ \text{mm}$	$(Ke\ 0,1 = 8,7\ \%)$

Bassin sur massif granitique avec assez forte pente à l'amont, mais une partie importante de la superficie est perméable (arènes, sables, granite en boules) et les collecteurs principaux sont à pente faible. Ce n'est pas un vrai bassin de montagne comme la Tsanaga à Bogo. Il réagit de façon comparable au Goulbi de Maradi, ce qui donne à penser qu'au moins une partie des cours d'eau du plateau de Jos (Nigéria) se comporte de même façon, mais avec des écoulements plus forts de 20 à 30%.

La courbe représentative a été reportée sur la figure 6.

3.4.2.4. La Kabia à Gounou Gaya (Tchad)

$S = 3\ 840\ \text{km}^2$; précipitation annuelle en année médiane : 1 030 mm.

$E\ \text{méd.} = 16\ \text{mm}$	$Ke\ \text{méd.} = 1,55\ \%$
$E\ 0,9 = 8\ \text{mm}$	$E\ 0,1 = 40\ \text{mm}$

Bassin à faible pente sur les sables de Kelo (tertiaire). On voit sur la figure 6 l'influence régulatrice de ces sables au prix de pertes considérables par évapotranspiration.

La courbe représentative a été reportée sur la figure 6.

3.4.2.5. La Tsanaga à Bogo (Cameroun)

$S = 1\ 535\ \text{km}^2$; précipitation annuelle en année médiane : 855 mm.

$E\ \text{méd.} = 166\ \text{mm}$	$Ke\ \text{méd.} = 19,4\ \%$
$E\ 0,9 = 82\ \text{mm}$	$E\ 0,1 = 230\ \text{mm}$

Bassin de montagne sur granite, le collecteur principal est à forte pente. La Tsanaga correspond à peu près aux conditions d'écoulement optimales. Cependant, il y a dégradation hydrographique à l'aval dans la cuvette tchadienne, en forte crue ce qui explique la valeur de $E\ 0,1$ qui serait nettement plus élevée s'il n'y avait pas débordement dans la plaine et départ d'un effluent.

Les Mayos du nord Cameroun au nord de Gaoua ont un régime comparable à celui de la Tsanaga.

La courbe représentative a été reportée sur la figure 6.

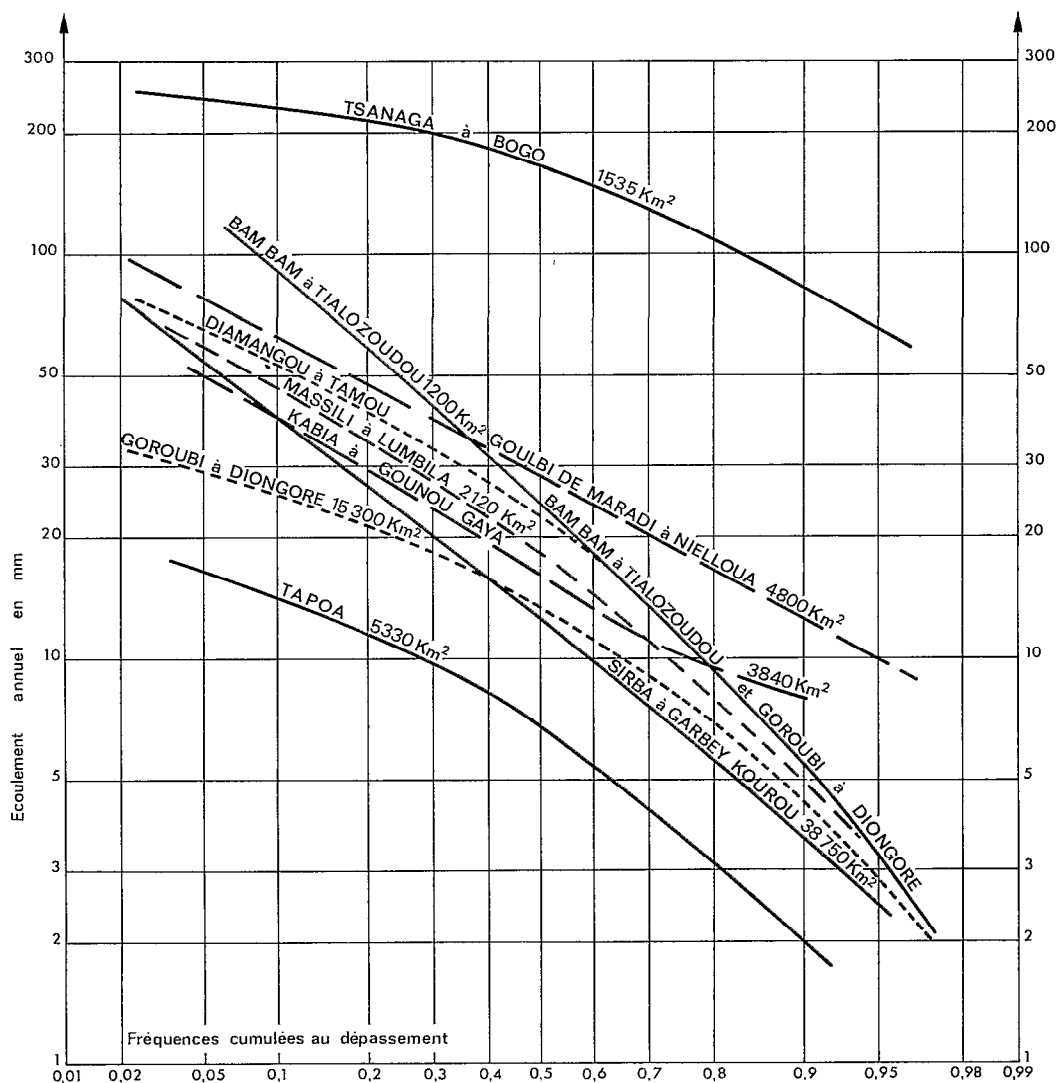
3.4.2.6. Le Goulbi de Maradi à Nielloua (Nigéria, Niger)

$S = 4\ 800\ \text{km}^2$; précipitation annuelle en année médiane : 775 mm.

$E\ \text{méd.} = 28\ \text{mm}$	$Ke\ \text{méd.} = 3,6\ \%$
$E\ 0,95 = 10\ \text{mm}$	$E\ 0,05 = 76\ \text{mm}$

Bassin sur granite assez perméable, assez comparable à celui du Bam Bam, mais à la station de Nielloua il n'y a pas eu encore de dégradation hydrographique. L'écoulement, s'il était ramené à une hauteur de précipitation moyenne de 800-835 mm au lieu de 775 mm, serait nettement plus important que sur le Bam Bam (majoration 20 à 30%), mais bien inférieur à celui de la Tsanaga qui comporte une bonne part de sols à fort ruissellement avec forte pente. Le Goulbi de Maradi à Nielloua donne une idée des régimes du versant nord du plateau de Jos.

La courbe représentative a été reportée sur la figure 6.



Nota : Pour le Bam Bam à Tialozoudou, la partie inférieure de la courbe est confondue avec celle du Goroubi

Fig. 6. — Ecoulement annuel dans la zone tropicale sèche. P = 750-1 000 mm. Distributions statistiques. Bassins de plus de 1 000 km²

3.4.2.7. Le Dallol Maouri à Bengou (Niger)

S = 2 800 km² (superficie active) ; précipitation annuelle en année médiane : 750 à 800 mm.

E méd. = 1 mm

Ke méd. = 1,3%

E 0,9 = 0,2 mm

E 0,93 = 0,002 mm

E 0,10 = 4 à 5 mm

Ce bassin, à très faible écoulement, draine une large vallée fossile à très faible pente. Pratiquement, le bassin n'est alimenté que par sa partie méridionale (P moyen = 800 à 850 mm). On trouverait probablement des écoulements du même type sur les quelques réseaux organisés des grandes cuvettes lacustres.

Mais le Dallol Maouri est le seul exemple étudié. Le Ba Illi du Nord, affluent du Chari, n'a été observé régulièrement que pendant un an. Le chiffre de 1 mm est à rapprocher de celui du Bahr Salamat : 3 mm, mais en général, les sols du sud du Bahr Salamat doivent être plus imperméables que ceux de la vallée du Dallol Maouri.

La courbe représentative a été reportée sur la figure 6.

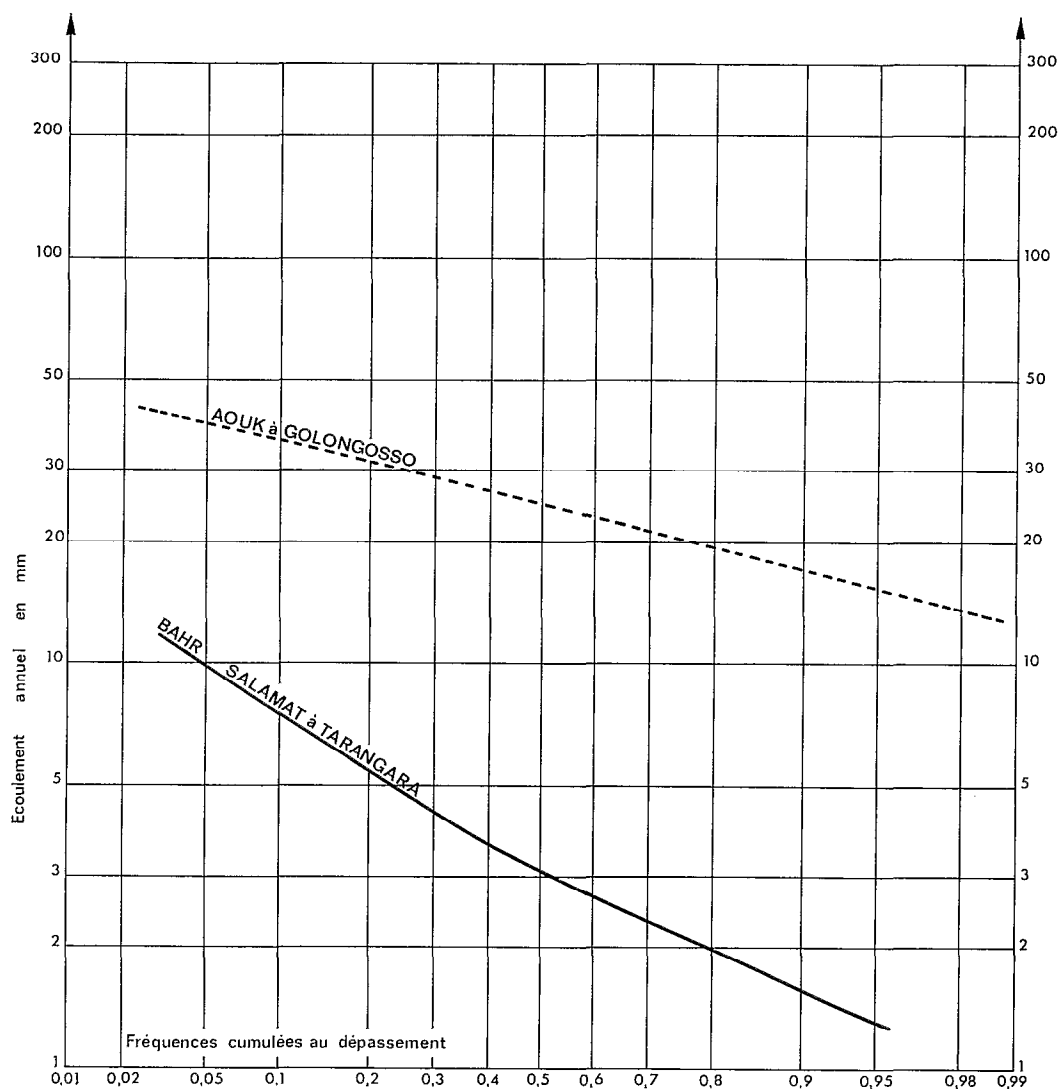


Fig. 7. — Courbes de distribution de grands cours d'eau de la zone tropicale sèche (Afrique occidentale)

3.4.2.8. La Tapoa (Niger)

$S = 5\,330 \text{ km}^2$; précipitation annuelle en année moyenne : 800 mm.

E méd. = 6,8 mm

Ke méd. = 0,85%

E 0,9 = 2 mm

E 0,1 = 14 mm

Cours d'eau à très faible pente comparable à la Kabia sur la majeure partie de son cours. Substratum : granite et grès à l'aval.

Ke médian serait le même que celui de la Kabia si le bassin recevait 1 030 mm. Il semble que pour ce type de bassin Ke médian croisse rapidement avec la hauteur de précipitation annuelle, entre $P = 700 \text{ mm}$ et $P = 1\,100 \text{ mm}$. Ceci est très net sur la Volta blanche par exemple.

La courbe représentative a été reportée sur la figure 6.

3.4.2.9. *Le Diamangou à Tamou.*

S = 4 030 km² ; précipitation annuelle en année médiane P = 780 mm.

$$\begin{aligned} E \text{ méd.} &= 22,5 \text{ mm} \\ E 0,9 &= 5,4 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Ke \text{ méd.} &= 2,9\% \\ E 0,1 &= 53 \text{ mm} \end{aligned}$$

Cours d'eau à assez faible pente. Substratum, granite, roches vertes et schistes, Continental terminal à l'aval
La courbe représentative a été reportée sur la figure 6.

3.4.2.10. *Le Goroubi à Diogoré (Niger)*

S = 15 300 km² ; précipitation annuelle en année médiane : 750 mm.

$$\begin{aligned} E \text{ méd.} &= 13,5 \text{ mm} \\ E 0,9 &= 4,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Ke \text{ méd.} &= 1,8 \text{ \%} \\ E 0,1 &= 26 \text{ mm} \end{aligned}$$

Bassin à assez faible pente. Substratum identique à celui du Diamangou.
La courbe représentative a été reportée sur la figure 6.

3.4.2.11. *La Sirba à Garbey Kourou (Niger, Haute-Volta)*

S = 38 750 km² ; précipitation annuelle en année médiane : 700-750 mm.

$$\begin{aligned} E \text{ méd.} &= 12,5 \text{ mm} \\ E 0,95 &= 2,4 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Ke \text{ méd.} &= 1,7\% \\ E 0,05 &= 54 \text{ mm} \end{aligned}$$

Bassin argileux à très faible pente sur granite.
La courbe représentative a été reportée sur la figure 6.

3.4.2.12. *La Massili à Loumbila (Haute-Volta)*

S = 2 120 km² ; précipitation annuelle en année médiane : 825 mm.

$$\begin{aligned} E \text{ méd.} &= 18,5 \text{ mm} \\ E 0,9 &= 5 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Ke &= 2,22\% \\ E 0,1 &= 48 \text{ mm} \end{aligned}$$

Bassin argileux à faible pente sur granite, très cultivé. Réactions très comparables à celles du bassin précédent.
La courbe représentative est figurée sur la figure 6.

3.4.2.13. *La Volta Blanche à Yakala (Haute-Volta)*

S = 33 000 km² ; P = 950 mm à la station.

$$\begin{aligned} E \text{ méd.} &= 30 \text{ mm} \\ E 0,9 &= 10 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$E 0,1 = 50 \text{ mm}$$

Ce bassin est assez plat, seule la moitié Sud a un écoulement significatif, le Nord du bassin a été étudié avec l'écoulement des pays du Sahel. La station de Wayen présente un écoulement de 9 mm (1) en année médiane (S = 20 000 km²).

C'est donc que les 13 000 km² aval doivent présenter un écoulement de 62 mm en année voisine de la médiane. La partie centrale du bassin dans la région de la Massili a un écoulement de 18 à 20 mm.

La courbe représentative du bassin total, assez voisine de celle du Goulbi de Maradi sauf dans la partie gauche, n'a pas été représentée sur la figure 6.

3.4.2.14. *La Volta Rouge à Sakoinse (Haute-Volta)*

S = 1 210 km² ; précipitation annuelle en année médiane 850-900 mm.

Il semble que E médian soit compris entre 16 et 20 mm.

Ke médian serait de l'ordre de 2%.

Le bassin argileux est très plat. Conditions comparables à celles du Massili à Loumbila.

(1) Le chiffre provisoire publié en 1975 était de 6 mm.

3.4.2.15. Le Banifing de San à Pinia (Mali)

S = 2 960 km² ; précipitation annuelle en année médiane : 1 000 mm.

E méd. = 29 mm
E 0,9 = 10 mm

Ke méd. = 2,9%
E 0,1 = 46 mm

L'écoulement est un peu plus faible que pour 740 km². Plus à l'ouest, sur le plateau Mandingue, il est probable que l'écoulement annuel est plus élevé, peut-être le double.

Nous n'avons aucune indication plus à l'ouest, toutes les grandes rivières étudiées traversant le plateau viennent du Fouta Djallon ou de ses contreforts et sont fortement influencées par le régime guinéen beaucoup plus humide.

3.4.3. Conclusions

Si par des corrections tout à fait empiriques, on rectifie les coefficients d'écoulement en année médiane pour ramener les divers cas étudiés à l'isohyète 850 mm, on trouve :

- un cas isolé : cours d'eau de montagne sur granite avec certains terrains imperméables. Ke médian = 19,4% ;
- des régions granitiques moins accidentées avec terrains nettement perméables. Ke médian = 19,4% ;
- des régions assez plates avec sol en majeure partie imperméable. Ke médian = 2 à 2,5% ;
- des plaines alluviales. Ke médian = 0,9 à 1,5%.

Le cas de la Tapoa est un peu spécial, la pente très faible dans la majeure partie du cours de cette rivière, conduit à un coefficient d'écoulement voisin de celui de la Kabia.

De façon générale, le coefficient d'écoulement décroît de l'amont vers l'aval, mais cette décroissance est modérée, sauf peut-être pour les bassins sur grès et sans rapport avec ce qui est observé dans les régions sahéliennes. Il croît assez rapidement avec la hauteur médiane de précipitations dans les régions argileuses à faible pente, telles que le centre de la Haute-Volta.

4. CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Les éléments de calcul de l'écoulement, qui sont présentés dans cette note, ne constituent en quelque sorte que des points de repères, sauf peut-être en ce qui concerne les bassins sur substratum de granite ou de granito-gneiss pour lesquels on dispose d'assez nombreuses données. Encore faut-il parvenir à définir la perméabilité des sols des bassins que l'on a à étudier, ce qui n'est pas toujours facile. On se méfiera de certains sols sablo-argileux battants qui constituent une croûte imperméable après les premières pluies, malgré une teneur en argile assez modeste et des sols sableux perméables de faible profondeur sur matériaux imperméables.

Quand on aborde les grès, à supposer que ceux-ci soient affleurant sur de larges surfaces, on rencontre des difficultés plus importantes : ils peuvent être assez imperméables s'ils sont encore en bon état, ou perméables s'ils sont diaclasés. On peut en dire autant des cuirasses ferrugineuses qui recouvrent souvent les grès. De façon générale, les informations dont on dispose sur les bassins gréseux à l'ouest du Niger sont insuffisantes : deux ou trois bassins représentatifs y seraient bien utiles, ainsi que quelques stations sur le réseau du fleuve Sénégal, sous réserve que les bassins contrôlés par ces stations ne s'étendent pas trop loin vers le Sud ; il faudrait qu'ils restent au Nord de l'isohyète 1 100 mm, sinon il n'est plus possible de transposer les résultats obtenus à la zone tropicale sèche. Des études à l'ouest de la Falémé rendraient également les plus grands services. On peut déjà espérer que certaines stations, récemment installées au Sénégal, permettront de compléter partiellement cette lacune.

Enfin, il reste la partie nigériane où des études ont été faites depuis plus de dix ans, mais nous en ignorons les résultats. Il ne semble pas que des bassins représentatifs aient été aménagés dans cette partie de la bande tropicale sèche étudiée.

5. BIBLIOGRAPHIE

- BRUNET-MORET (Y) – Précipitations journalières de l'origine des stations à 1965.
 — République du Tchad (1973, 643 p.)
 — République du Dahomey (Bénin) (1973, 522 p.)
 — République du Mali (1974, 1 081 p.)

- République du Niger (1976, 505 p.)
 - République du Sénégal (1976, 871 p.)
 - République de Haute-Volta (en cours d'impression)
 - République du Togo (en cours d'impression)
- Comité Interafricain d'Études Hydrauliques – Ministère de la Coopération – *ORSTOM, Service Hydrologie* – Paris.
- DUBREUIL (P) et al. – 1972 – Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux – Années 1951 – 1969. *ORSTOM, Service Hydrologie* – Paris, 916 p. impr.
- RODIER (J) – 1964 – Régimes hydrologiques de l'Afrique Noire à l'Ouest du Congo. *Mémoires ORSTOM*, Paris, n° 6, 137 p. impr. fig. tabl. 24 pl. fotogr.
- GIRARD (G) – 1975 – Modèles mathématiques pour l'évaluation des lames écoulées en zone sahélienne et leurs contraintes. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrologie*, vol. XII, n° 3.
- BRUNET-MORET (Y) – 1975 – Essais sur la persistance des précipitations annuelles en Afrique Occidentale. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrologie*, vol. XII, n° 4.
- RODIER (J) – 1975 – Évaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel tropical africain. *Travaux et documents de l'ORSTOM*, Paris, 121 p. impr. 29 fig. 4 pl. fotogr.
- ROCHETTE (C) – 1974 – Le bassin du fleuve Sénégal *Monographies Hydrologiques ORSTOM*, Paris, 440 p. impr. 3 cartes h. t.
- BILLON (B) et al. – 1974 – Le bassin du fleuve Chari. *Monographies Hydrologiques ORSTOM*, Paris, 450 p. impr. 5 cartes h. t.
- TOUCHEBEUF de LUSSIGNY (P) – 1970 – Monographie hydrologique du Bassin du Niger, 3 vol.
1^{re} partie – Le Niger Supérieur et le Bani, 178 p. 9 cartes et pl. h. t.
2^e partie – La cuvette lacustre, 169 p. 6 cartes et pl. h. t.
3^e partie – Le Niger Moyen, 160 p. 3 cartes et pl. h. t.
Secrétariat d'État aux Affaires Étrangères – Comité Interafricain d'Études Hydrauliques – *ORSTOM*, Paris, impr.
- BOUCHARDEAU (A) et al. – 1966-1968 – Monographie Hydrologique du Logone. 2 tomes, 6 parties, *ORSTOM*, Paris, 1 540 p. 14 pl. et c. h. t. multigr.