

I. ÉTUDES DE CRUES SUR UN PETIT BASSIN DE LA RÉGION DE MAROUA (NORD-CAMEROUN)

par

Pierre DUBREUIL

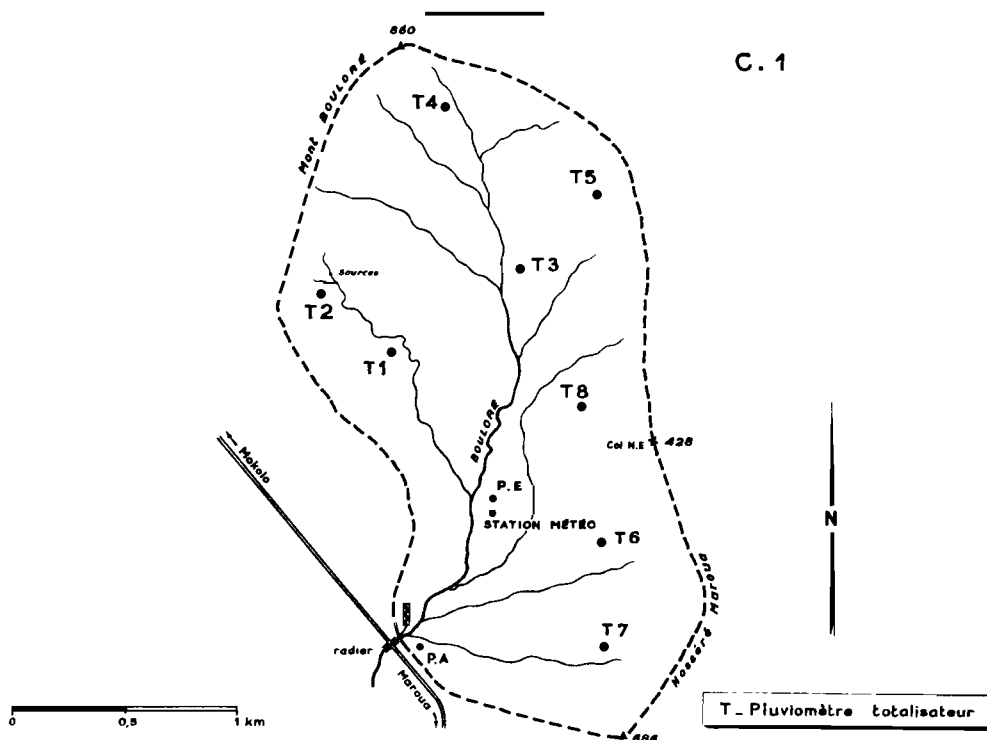
*Diplômé par l'École Nationale du Génie Rural
Ingénieur-Hydrologue de la Commission Scientifique du Logone et du Tchad*

La campagne d'études effectuées sur le bassin versant du BOULORÉ à MAROUA, a duré du 1er Juin au 1er Novembre 1954.

A - DONNÉES SUR LA GÉOGRAPHIE PHYSIQUE

Le bassin versant choisi est situé dans la zone montagneuse du Nord-Cameroun, à 5 km. au Nord de MAROUA (voir carte ci-contre). Le bassin à l'aspect d'un rectangle allongé (coefficient de forme = 1,73) et couvre une superficie de 3,75 km².

BASSIN VERSANT DU BOULORE



1°) - Relief :

Le bassin versant est bordé sur trois côtés par des montagnes qui culminent à 860 m. au Mont BOULORÉ. La pente de leurs versants est très forte (30 à 45 %); la rupture de pente est nette avec la plaine qui occupe la majeure partie du bassin et s'étend du Nord-Est au Sud-Ouest, entre les cotes 430 et 410 m.

Sur le côté plat du rectangle, l'exutoire du bassin franchit la route de MOKOLO par un radier en béton; nous y avons installé la station de jaugeage.

2°) - Géologie :

Le bassin versant est situé dans une zone d'émergence de roches éruptives, au sein du massif granitique. La constitution géologique du bassin est, de ce fait, très homogène.

Victimes d'une longue érosion, les roches éruptives sont recouvertes de leurs produits de décomposition. Les rares affleurements dans les coudes bien érodés des lits de mayos montrent une roche marron, schistoïde, qui s'effrite en poussière dans la main. En-dessous, on trouve la roche compacte; dont la cassure révèle la teinte verte originelle. A l'examen, cette roche verte présente deux degrés de cristallisation différents; il s'agit, pour l'un, d'andésite et, pour l'autre, peut-être d'une micro-andésite ou d'un basalte. L'andésite est la plus répandue. De nombreux filons de quartz ont laissé des traces sous forme de galets qui jonchent le sol.

3°) - Pédologie :

Résultat de la décomposition des roches vertes, le sol du bassin est remarquablement homogène. Bien que superposés, les trois horizons que nous discernons aujourd'hui appartiennent à deux sols d'origines différentes :

- a - Sol d'origine colluviale : il s'est constitué sur les éléments arrachés aux montagnes et déposés dans la plaine, lors de l'érosion ancienne. Il comprend deux horizons :
 - un horizon superficiel argilo-humifère sur 10 à 50 cm., de teinte marron-noir; il fait parfois défaut,
 - un horizon argilo-caillouteux sur 50 cm. à 1 m. d'épaisseur, de teinte marron-rouge clair; il renferme de nombreux cailloux, fragments de la roche verte.
- b - Sol en place : au-dessus de la roche-mère à l'aspect schistoïde, première phase de la décomposition de la roche verte, on trouve un horizon de décomposition argileux, jaunâtre; il est juste sous l'horizon caillouteux précédent.

4°) - Végétation :

Nous sommes en bordure de la zone sahélienne (pluviométrie : 825 mm.); la savane arbustive est mixte. Les feuillus subsistent et dominent sur les pentes (*Boswellia*); les épineux dans la plaine (*acacias*, *balanites*, *bauhinia*, etc...). Les feux de brousse et les six mois de saison sèche inhibent toute végétation herbacée permanente. En saison des pluies, on trouve des graminées (*Pennisetum*, *Hyparrhénia*, *Andropogon*, etc...), des *Indigofera*, etc... Cette végétation herbacée, haute de 1 à 2 m. paraît de loin impressionnante; en fait, la densité est faible : le sol est pratiquement nu sous cette fausse couverture; de plus, l'abondance des eaux en saison des pluies permet un système radicaire réduit et superficiel, peu efficace contre l'érosion du sol. La vitesse des eaux de ruissellement et l'érosion ne sont que faiblement amorties par cette faible couverture herbacée; le phénomène est certainement encore plus intense en mai, la végétation n'ayant pas encore repoussé.

5°) - Érosion et Hydrographie :

L'érosion, qu'ont subi les roches éruptives à leur stade juvénile, a donné naissance au faciès morphologique actuel : croupes molles, sommets arrondis, couverts d'une maigre végétation; plaine formée sur les éléments arrachés aux pentes. L'érosion continue, de nos jours, sur tout le bassin. Érosion en nappe d'abord, caractérisée par l'absence partielle de l'horizon humifère du sol et par la présence sur la surface du sol des cailloux de l'horizon inférieur. Érosion en rigole ensuite, dès que la pente s'accroît, puis érosion en ravin sur les fortes pentes. Ces ravins typiques en "V" sont à l'origine des mayos. (1).

Le MAYO-BOULORÉ présente un lit bien marqué à partir de la cote 475 m., sur le flanc du MONT-BOULORÉ; il coule avec une forte pente, dans la direction Nord-Sud, avec de nombreuses sinuosités. Très vite, il atteint la roche et son profil est alors en "U", s'évasant de plus en plus vers l'aval, par érosion des berges. Il reçoit une dizaine d'affluents avant d'atteindre le radier; il présente alors un lit de 10 m. de large limité par des berges tantôt encaissées de 2 m., tantôt douces et couvertes d'herbes; son lit est encombré de graviers.

Les eaux du mayo ont une force érosive considérable. Elle s'exerce aux dépens des rives concaves de ses sinuosités qui s'éboulent par pans entiers lors des crues. Les éléments fins et grossiers sont entraînés; les cailloux brassés vont constituer d'énormes barrages sur les rives convexes, dominant, parfois d'un mètre, les mouilles concaves où la roche est à nu. Le profil en long du mayo est frappant : c'est une succession de mouilles, séparées par ces biefs de cailloutis où le chenal des eaux n'apparaît pas (entre les crues, le mayo est à sec); le remplissage des mouilles est nécessaire avant que l'écoulement puisse débiter. C'est un phénomène assez général pour les mayos de ces régions.

(1) Les "mayos" (terme Foulbé signifiant rivière) du Nord-Cameroun sont des cours d'eau à régime torrentiel, pente relativement forte, transports solides considérables.

6°) - Conséquences pour l'écoulement :

Un relief accentué favorisant le ruissellement, un sol argileux limitant l'infiltration, une végétation faible n'annulant pas l'érosion, un profil en long libérant le flot de crue brutalement quand le lit est plein sont des faits qui laissent présager un écoulement des eaux de crues brutal, une montée rapide, une grande vitesse des eaux et un débit solide important.

B - DONNÉES CLIMATOLOGIQUES

1°) - Station météorologique :

Dans une position assez centrale à l'intérieur du bassin, elle comprend :

- pluviomètres de divers types (voir paragraphe suivant)
- évaporomètre Piche
- psychromètre
- thermomètre à maxima et minima
- girouette
- 1 bac d'évaporation Colorado enterré, situé à 20 m. du mayo dans la plaine, hors de l'influence du lit et de son encaissement.

Les observations n'ont pas été très régulières : par suite de l'éloignement de MAROUA, les horaires d'observation n'ont pas été absolument fixes (léger décalage vers 7 h. 30 et 17 h.).

2°) - Résultats obtenus :

Voici quelques tableaux donnant le résumé des principales observations :

- Température :

	Juin	Juil.	Aout	Sept.	Oct.
Moyenne des maxima	35°6	33°6		36°0	33°5
Moyenne des minima	22°4	23°0		20°3	19°3

- Humidité :

Les horaires des lectures expliquent le décalage vis-à-vis des relevés du poste météorologique de MAROUA, entre parenthèses :

Mois	Humidité relative en %		
	Moy. de 6 h.	Moy. de 13 h.	Moy. de 18 h.
Juillet	76.5 (91.5)	62.5 (64.5)	71.5 (78.5)
Août	83 (92)	70 (69)	71 (80.5)
Septembre	(88.5)	(64)	(77.5)
Octobre	81 (89.5)	(58)	71 (79.5)

- Vents :

La présence d'un col au Nord-Est du bassin explique la légère distorsion dans la rosace des fréquences correspondant au tableau ci-après :

Directions	N	N-E	E	S-E	S	S-W	W	N-W	Fréq. des vents d'W
Juillet	1	2		2		7	1	10	78 %
Août		3		6		22	7	16	83
Septembre		3	1		2	10	4	4	75
Octobre	2	9	3	10	5	5	14	14	53

- Évaporation :

Tableau comparatif des hauteurs d'eau évaporées au bac Colorado et à l'évaporomètre Piche, entre parenthèses les relevés de MAROUA :

Mois	Bac Colorado		Évaporomètre Piche		Rapport Colorado Piche
	H mm.	mm/j.	H mm.	mm/j.	
Juin	140.9	4.7 (6.1)	116	3.9 (3.6)	1.2
Juillet	113.3	3.6 (4.3)	84.4	2.7 (2.2)	1.35
Août	88.6	2.9 (3.4)	49.2	1.6 (1.7)	1.8
Septembre	124.2	4.1 (4.4)	63.3	2.1 (2.1)	1.95
Octobre	207.6	6.7 (5.7)	95.9	3.1 (3.9)	2.15
Total moyen	674.9	4.4	408.8	2.65	1.65

Les aberrations dues aux erreurs de relevés mises à part, on peut conclure de la comparaison avec MAROUA que la nature encaissée de la vallée conduit à une atmosphère plus lourde et plus chaude, entraînant une évaporation plus faible en saison humide et plus forte, au contraire, dès octobre, sur le bassin du BOULORÉ.

C - ÉTUDE DE LA PLUVIOMÉTRIE

1°) Réseau pluviométrique :

Malgré la petite superficie du bassin, la présence de versants montagneux différemment exposés, formant écrans aux nuages et influençant le régime des vents, était susceptible d'engendrer une certaine diversité dans les précipitations. Aussi, un réseau dense de pluviomètres a-t-il été installé :

- un pluviomètre enregistreur à la station météo; cet appareil Richard, doté d'un tambour à rotation de 4 jours, puis de 48 h., fournit des courbes tronquées au sommet par retard inexplicable du siphonage, difficiles à dépouiller, mais néanmoins utiles. Il cessa de fonctionner comme enregistreur le 19 Août à la suite du vol de certaines pièces.
- un pluviomètre "Association" placé à proximité de la station de jaugeage; ses relevés fréquents lors d'une tornade ont fourni un "enregistrement" de remplacement.
- des pluviomètres "totalisateurs". Situés en des points éloignés et non relevés journalièrement, une couche d'huile de vidange de 1 cm., recouvrant l'eau de pluie, empêchait toute évaporation. C'était d'abord des demi-fûts d'essence (D = 60 cm., H = 45 cm.); ils furent volés par les autochtones, avides de fer. Ils ont été remplacés alors par des bacs en béton (D = 50 cm., H = 30 cm.); ils avaient une épaisseur de 6 cm., d'où il résultait un effet de bord notable. Une étude systématique entre un totalisateur et un pluviomètre Association, sur 20 tornades, a montré qu'il fallait multiplier les résultats du bac par un coefficient correctif de 0,71. La mesure de la pluie s'effectuait avec un mètre gradué, donnant une précision du millimètre.

2°) Etude des pluies :

Le régime pluviométrique sur le bassin est semblable à celui de MAROUA, tant en hauteur d'eau qu'en répartition des pluies. Il s'agit d'un régime tropical assez classique caractérisé par une saison des pluies bien marquée en Juillet, Août, Septembre, début Octobre, précédée par une saison sèche très rigoureuse de Novembre à Avril. Une courte période orageuse en Mai ou Juin, suivie parfois d'une petite période sèche, forme la transition entre les deux saisons.

La hauteur pluviométrique annuelle dans la région de MAROUA est en moyenne de 800 mm.

Les averses, sur le bassin du BOULORÉ, présentent deux aspects :

- les pluies normales arrivant par le col Nord-Est, qui tombent régulières sur le bassin, en favorisant cependant le versant du BOULORÉ, face au col;
- les nuages sur MAROUA sont parfois repris par des sautes de vents du Sud-Ouest, contournent l'HOSSERA MAROUA et pénètrent par la face Sud ouverte en grand.

Ces pluies s'enfoncent rarement dans le cirque; elles donnent une forte précipitation au bord de la route (pluviomètre Association), quelques gouttes ou rien sur le reste

du bassin (pluviomètre enregistreur). Pour cette raison, le total des précipitations reçues par l'enregistreur, comme pour l'ensemble du bassin, est inférieur de 10 à 20 % à celui du pluviomètre Association.

Quand les données des totalisateurs ont fait défaut, nous avons calculé la pluie pondérée sur le bassin avec la formule :

$$\text{Pluie pondérée} = 1/3 \text{ pluie "Association"} + 2/3 \text{ pluie "enregistreur"}$$

Les résultats sont les suivants :

- Tableau des précipitations :

Mois	Pluv. Association	Pluv. Enregistreur	Moyenne bassin	MAROUA (Agricult.)
Juin	56.4	49.3	53	70.9
Juillet	283.6	222.4	240.5	217.1
Août	381.1		330	328
Septembre	122.1		84.5	87.1
Octobre	26.5	22.3	19.6	40.3
Total	869.7		727.6	743.4

1954 est une année pluvieuse; à MAROUA-Agriculture le total annuel a été de 877.5 mm. alors que la moyenne interannuelle calculée sur 23 ans n'est que de 805 mm.

- Tableau des fréquences des pluies (pluv. Association) :

	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Total
Nbre de jrs de pluie	8	17	17	10	4	56
Pluies de 0-10 mm.	7	7	4	6	4	28
" " 10-20 mm.	1	6	4	3		14
" " 20-30 mm.		2	6			8
" " 30-40 mm.		1				1
" " 40-50 mm.			1			1
" " 50-60 mm.						0
" " 60-70 mm.			2	1		3
" " 70-80 mm.		1				1

En début et en fin de saison des pluies, les tornades, bien que violentes, sont très courtes et donnent une faible hauteur d'eau.

Les plus fortes précipitations ont été :

- le 17/7 : 79.9 mm. en 2 h.25', avec une intensité maximum de 41 mm/h.
- le 18/8 : 63.1 mm. de durée inconnue
- le 28/8 : 63.5 mm., dont 58 mm. en 45', soit à une intensité de 77 mm/h., intensité assez rare.

La plus forte pluie connue dans la région Tchad - Nord - Cameroun qui s'est produite à FORT-LAMY en Août 1950 donna 180 mm., dont 135 mm. en 2 h. (intensité de 67,5 mm/h.) D'après d'autres données, en zone soudanienne, il semble que l'averse d'août 1950 se produise une fois tous les cinquante ans. Nous en reparlerons dans l'étude de la crue résultante.

Les averses provenant du Sud-Ouest donnent lieu à des précipitations très peu homogènes. Les averses venant du Nord-Est sont beaucoup mieux réparties sur le bassin. Il semble cependant que le nombre total de pluviomètres que nous avons installés corresponde au strict minimum nécessaire pour obtenir les hauteurs de pluie moyenne avec une précision suffisante.

D - ÉTUDE HYDROLOGIQUE DU BASSIN

1°) ÉQUIPEMENT DU BASSIN :

a - Station limnimétrique :

L'échelle limnimétrique a été placée environ 20 m. en amont du radier, dans une section tranquille, la cote de son zéro étant égale à celle du seuil.

L'enregistrement des crues était effectué à l'aide d'un limnigraphe à dépression, voisin de l'échelle. Cet appareil s'est avéré assez défectueux. Etanchéité difficile à obtenir; rotation trop lente (tambour de 8 et 3 jours pour des crues de 4 à 6 h.); sensibilité trop faible (pour H = 1 m., 22 mm.) : par suite, les courbes étaient trop petites, leur agrandissement pour l'étude entraîne une grande imprécision.

b - Mesures des débits :

L'extrême rapidité des crues ne nous a pas permis de faire des mesures au moulinet. Le radier en béton fonctionnant comme déversoir à seuil épais, nous avons calculé les débits, à l'aide de la formule de BAZIN :

$$Q = k_2 \cdot k_3 \cdot u \cdot S \cdot \sqrt{2gH}$$

avec :

$$u = \left(0,405 + \frac{0,003}{H}\right) \left(1 + 0,55 \left(\frac{H}{H+Z}\right)^2\right)$$

Le coefficient k₂ tient compte de l'épaisseur b du seuil et de la vitesse d'approche en amont :

$$k_2 = 0,70 + 0,185 \frac{H}{b}$$

Quant la charge devient supérieure à 2/5 z' (hauteur du seuil au-dessus du fond en aval, égal à 1,80 m), soit 0,72 m., la nappe est noyée et l'on utilise :

$$k_3 = 0,878 + 0,128 \frac{H}{z'}$$

La section critique du déversoir présente une discontinuité pour une charge de 0,50 m., la nappe d'eau débordant latéralement sur la route. Une correction a été apportée à la section par mesure de la surface de débordement.

Les calculs ainsi effectués ont permis d'établir une courbe débits/hauteurs, pour une charge de 0 à 1,50 m.

2°) RÉGIME HYDROLOGIQUE

Du type tropical pur, il est caractérisé par quelques rares crues pendant la "petite saison des pluies", Mai ou Juin, et par une série de crues plus importantes, généralement isolées pendant la saison des pluies; le tarissement ne dure que quelques heures. Il arrive cependant que l'écoulement persiste entre deux crues. L'écoulement s'arrête, bien entendu, dès la fin de la saison des pluies. Le lit du mayo reste à sec du début Octobre à fin Mai.

Le graphique annuel du MAYO-TSANAGA, correspondant à un bassin versant beaucoup plus grand, donne une idée de ce régime, bien que le tarissement soit beaucoup plus lent.

La présente étude ayant pour objet l'estimation des crues exceptionnelles sur le bassin, nous avons cherché à appliquer la méthode des hydrogrammes unitaires, ce qui exige tout d'abord l'enregistrement simultané des précipitations et des débits; les deux paragraphes suivants font le bilan des observations.

3°) CLASSEMENT DES CRUES :

Le tableau suivant fait le bilan de la campagne d'étude des tornades et crues :

	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Total
Chutes de pluies	11	15	15	9	3	53
Pluies à écoulement possible	1	13	11	3	0	28
Pluies et crues enreg.	0	3	10	3	0	16

Sur 28 cas d'écoulement possible, 12 n'ont pu être observés, mais parmi ces derniers, trois cas ont dû donner un écoulement notable.

Classement des pluies et crues enregistrées :

- Hydrogrammes unitaires possibles 6
- Durée de pluie trop longue 4
- Ecoulement "localisé" ou hypodermique 6

Sur ces 16 crues, 10 sont connues entièrement, les autres présentent des enregistrements incomplets; nous allons étudier ces crues suivant leur aspect, en vue de dégager, si possible, les caractéristiques de l'écoulement.

4°) VALEURS CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉCOULEMENT :

L'application de la méthode des hydrogrammes unitaires nécessite tout d'abord la détermination d'un certain nombre de caractéristiques concernant précipitations et écoulement; le tableau ci-après met en lumière ces caractéristiques pour les 16 crues analysées.

Pour une pluie et sa crue résultante, nous donnons une idée des possibilités d'infiltration en indiquant l'importance de la dernière pluie antérieure et l'écart de temps qui la sépare de la pluie étudiée.

Pour la pluie pondérée (cf. Pluviométrie), la présence de deux pointes successives est signalée par les deux intensités moyennes.

L'intensité excédentaire est la différence à chaque instant entre l'intensité de la précipitation pondérée et la capacité d'absorption en mm/heure. La hauteur de pluie excédentaire est la somme des intensités de pluie excédentaire. Elle est calculée à partir du coefficient de ruissellement relatif à chaque averse. Sa durée est déterminée à partir des diagrammes d'intensité donnés par le pluviomètre enregistreur et de la courbe de variation de la capacité d'absorption en fonction du temps. C'est la durée de pluie unitaire qui permet de préciser si l'averse est une averse unitaire.

Le temps qui s'écoule entre le centre de gravité de la pluie excédentaire et le maximum de la crue ou "lag" oscille autour de 25 minutes.

Le temps de montée ou "rise time" varie entre 15' et 20'. Le temps de concentration étant difficile à évaluer avec précision, nous avons pris comme durée limite correspondant à l'averse unitaire la moitié du rise time, soit 7 à 8'. En toute rigueur, ce temps est trop long et la netteté du diagramme de distribution s'en ressentira, mais pour une phase préliminaire telle que celle qui correspond à nos études, ce choix est encore admissible.

TABLEAU DES VALEURS CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉCOULEMENT

Date	Pluie antér.		Pluie pondérée			Volume pluie m ³	Volume écoulé	%	Pluie exc.		Rise	Lag	Q. max.
	mm.	écart tps	mm.	tps	lmm/h				mm.	tps			
12/7*	8.3	48 h	13	27'	29	48.700	13.200	27	3.5	7'	18'	25'	10.4
17/7	15.7	96	79.9	2h.25	var.	263.000							
23/7	11.6	48	9.4	30'	18.8	35.300	2.430	6.9					0.35
4/8	13.8	5 j	20.5	1h.25	14.8	77.000	6.000	7.8	1.6		30'	47'	1.5
5/8	20.5	24 h	26	6h.15	var.	97.500	12.700	13	3.4				0.65
8/8*	26	72 h	6.3	15'	25.2	63.500	9.600	15	2.6	6'	15'	22'	4.1
			10.6	1h.30	7								
9/8	16.9	24 h	18.3	1h.15	14.6	101.000	17.000	17	4.5	17'	10'	20'	2.6
			8.7	1h.30	5.8								
19/8*	9.8	4 j	63.1			237.000	39.600	17	10				4.6
24/8*	22.6	48 h	43			161.500	13.200	8.2	3.5		15'		10.4
25/8*	43	24 h	23			86.250	4.200	4.9	1.1		15'		2.6
26/8	23	12 h	12.7			47.500	3.000	6.3	0.8		10'		1.1
30/8*	63.5	48 h	21.9			82.500	6.600	8	1.8		15'		3.2
28/8	12.7	48 h	58	45'	77	238.000	113.000	47	30	23'	35'	23'	38.5
			5.5	40'	8.2								
1/9	21.9	48 h	39.4	1h.	40	147.500	50.500	34	13	20'	20'		27.5
9/9	1.3	4 j	13			48.700	2.100	4.3					0.35
15/9	14.6	24 h	12.5	2h.	var.	47.000	380	0.8					0.15

Crues unitaires.

Avant de passer à la recherche des hydrogrammes unitaires, nous devons donner quelques explications sur un phénomène particulier à ces cours d'eau à écoulement non permanent et à lit assez tourmenté.

5°) - ECOULEMENTS LOCALISÉ ET HYPODERMIQUE :

Par suite de la succession de mouilles et de seuils décrits plus haut et l'arrêt de l'écoulement entre les crues, le remplissage du lit demande un volume d'eau V consi-

dérable. Si une pluie fournit par ruissellement un volume supérieur à V, toutes les mouilles seront pleines et un écoulement s'établira sur l'ensemble du lit. Si le volume ruisselé est inférieur à V, certaines mouilles ne se rempliront pas; d'autres, plus petites, pourront déborder et les eaux s'écouler jusqu'à la mouille suivante, donnant ainsi lieu à un écoulement localisé à un tronçon du lit. Il n'y aura pas d'écoulement généralisé à l'ensemble du lit. Nous appelons ce phénomène : écoulement localisé.

Bien entendu, dans ce cas, la méthode des hydrogrammes unitaires est inapplicable, les temps de parcours n'ont plus aucune signification.

Voici un tableau des six cas d'écoulement localisé observés :

Date	Pluie mm.	Intens. mm/h.	Vol. pluie m ³	Vol. écoulé m ³	Vol. écoulé %	Débit max.
23/7	9.4	18.8	35.200	2.430	6.9	0.35
4/8	20.5	14.8	77.000	6.000	7.8	1.5
5/8	4.8	6.4	97.500	12.700	13	0.65
26/8	21.2	3.9	47.500	3.000	6.3	1.1
9/9	12.7		48.700	2.100	4.3	0.35
15/9	13		47.000	380	0.8	0.15
	12.5	var.				

La crue du 15/9 a été observée directement par l'hydrologue pendant toute sa durée et une mesure d'infiltration (méthode MUNTZ) a été effectuée durant la pluie. La répartition des intensités de pluie (pluviomètre Association) était la suivante :

Pluie	Durée	Intensité	Infiltration
8.7	40'	13 mm/h.	6.6 mm.
4.0	45'	5,3	5
1.2	35'		

Le ruissellement s'est produit sur le terrain durant les 40 premières minutes de pluie; la pluie pondérée étant de 7.8 mm., le ruissellement a atteint 1.2 mm., soit 4 500 m³ pour le bassin. Or, 380 m³ seulement se sont écoulés au radier. Plus de 4 000 m³ sont restés dans les mouilles comme nous avons pu l'observer; les 380 m³ correspondent à l'écoulement localisé aux mouilles voisines du radier et qui ont débordé.

Sauf celle du 5/8, toutes les autres pluies sont similaires à celle du 15/9; or, elles ont des coefficients d'écoulement de 4 à 6 %. Seule l'imprécision du limnigraphe pour les petits débits peut expliquer cette anomalie; à notre avis, ces quatre pluies ont donné des crues identiques à celle du 15/9, avec un coefficient d'écoulement de l'ordre de 1 %.

La crue du 5/8 ayant duré très longtemps, 6 h. 1/4, nous verrons plus loin que l'infiltration est alors très faible et qu'une pluie de 3.9 mm/h. peut provoquer un écoulement (même généralisé) voisin de 10 %.

L'écoulement hypodermique, déjà très faible, par suite de la densité peu importante de la végétation, ne produit qu'un débit négligeable dans le lit : en effet, l'irrégularité du profil en long détruit l'homogénéité des faibles écoulements, par le stockage dans les mouilles à chaque pluie.

L'écoulement souterrain est lui aussi inexistant ou négligeable; le mayo coule sur la roche et le sol argileux ne contient pas de nappe pouvant l'alimenter.

6°) - ESSAI DE DÉTERMINATION DE L'HYDROGRAMME UNITAIRE :

Sur six averses unitaires, seules deux sont utilisables, celles du 12 juillet et du 8 Août, l'intensité de la pluie n'ayant pas été relevée pour quatre d'entre elles; de plus, les crues du 25 Août et du 30 Août sont trop molles.

Les averses du 19 Août et du 24 Août auraient été intéressantes; le vol des pièces du pluviographe a empêché l'enregistrement des intensités, ce qui le rend à peu près inutilisable. Il n'est même pas certain qu'il s'agisse d'averses unitaires.

L'averse du 12 juillet a présenté une intensité de 29 mm/h. pour une hauteur pondérée de 13 mm. La pluie excédentaire, de durée 7' correspondait à un coefficient d'écoulement de 27 %. La pointe de crue a atteint 10,4 m³/sec. correspondant à 2 800 l/sec/km².

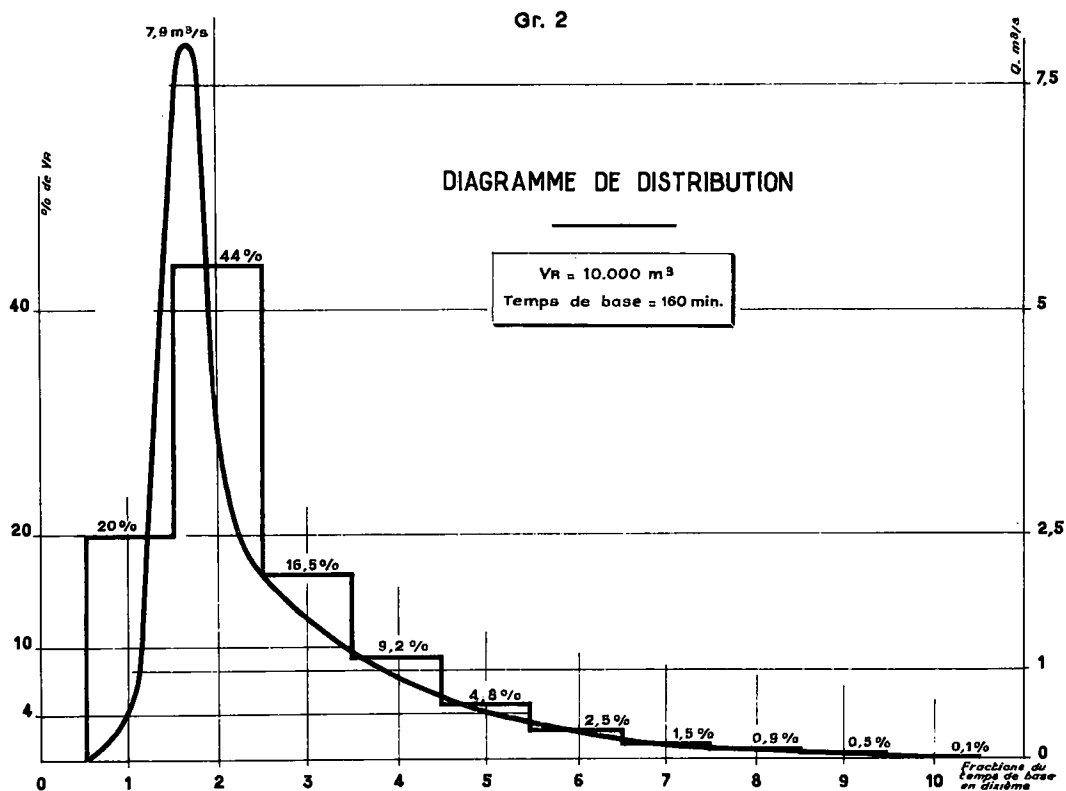
L'averse du 8 Août, d'intensité 26 mm/h. a été suivie d'une longue pluie fine qui a déformé la courbe de tarissement. Pour des intensités et une hauteur de pluie voisines, la pointe de crue a été beaucoup plus faible : 4,1 m³/sec., que celle du 12 juillet. Ceci tient à ce que la pluie est tombée sur un sol plus sec et que le hiéogramme était plus défavorable à l'écoulement, la pluie excédentaire n'étant d'ailleurs que de 2,6 au lieu de 3,5 mm.; le coefficient d'écoulement n'a été que de 8,2 %.

Le diagramme de distribution du MAYO-BOULORÉ (qui englobe à la fois écoulement hypodermique et écoulement souterrain) ne sera mis au point définitivement qu'après la réussite d'une seconde campagne; on peut cependant tracer un diagramme provisoire à partir de la crue du 12 Juillet qui semble correspondre, d'après l'observation des autres crues, à une forme plus aigüe que la moyenne.

Le temps de base de l'écoulement a été divisé en 10 parties égales qui voient, chacune, s'écouler un certain pourcentage du volume total écoulé, constant en principe avec toutes les crues :

1/ 10 du temps de base	% volume	1/ 10 du temps de base	% volume
1°	20	6°	2.5
2°	44	7°	1.5
3°	16.5	8°	0.9
4°	9.2	9°	0.5
5°	4.8	10°	0.1

En réalité, la forme de la crue est très raide et ce procédé est simpliste. Pour un volume d'écoulement unité de 10 000 m³, la pointe de crue est de 7.9 m³/sec., alors que la deuxième fraction de 44 % donnerait un débit moyen de 5.5 m³/sec. Pour cerner de plus près la pointe de crue, il faudrait diviser le temps de base (160') en 1/20° : les deux fractions correspondant à 44 % sont 32 % et 12 %. La première, 32 %, permet de trouver un débit moyen de 6.6 m³/sec. plus représentatif de la pointe de crue.



E - ÉTUDE DE L'INFILTRATION

Dans la méthode des hydrogrammes unitaires, on tient compte d'un facteur infiltration qui est, en fait, la somme de l'infiltration et de l'évaporation, mais cette dernière est très

faible étant donné la courte durée des averses et des crues : moins de 0,1 mm/heure.

1°) Mesure directe par la méthode MUNTZ :

- Tableau des essais :

Pluie antécédente	Écart de temps	Sol	Pouvoir filtrant mm/h.			moy.-10%
			Max.	min.	moy.	
14.6/13.1	12 h.	Hz. B	07	23	16	14
2.5	48 h.	B	25	18	21	19
1.3	48 h.	B	34	25	29.5	26
0.8	4 j.	A	70	55	62	56
0.8	5 j.	A	60	53		56
qq1/10	1 mois	B	72	54		63

Une réduction de 10 % a été effectuée pour les mesures faites sans cylindre protecteur.

Les remarques qui s'imposent sont les suivantes :

- les mesures ont donné des résultats homogènes.
- l'infiltration est la même sur les horizons humifères (A) et caillouteux (B)
- cinq jours après une pluie, le sol est ressuyé, la capacité normale de rétention atteinte : 56 mm/h. ; après un mois de sécheresse, on obtient seulement 63 mm/h.
- en début de saison des pluies, les tornades courantes seront sans écoulement possible, tant que leur fréquence ne descendra pas en-dessous de 4 à 5 jours d'écart, afin d'abaisser le besoin d'eau du sol vers 20 à 30 mm/h., intensités de précipitation assez fréquentes.

2°) Détermination indirecte de l'infiltration :

La différence entre les volumes d'eau de pluie et d'écoulement correspond au total de l'infiltration première (évaporation, consommation des plantes comprises). L'infiltration varie avec la durée de l'averse. Seule une pluie de courte durée peut donner une valeur significative de l'infiltration. Si une pluie tombe avec deux intensités, la première ne donnant pas de ruissellement, on calcule deux valeurs d'infiltration, l'une pour la pluie antérieure, l'autre pour l'intensité précédente de la même pluie.

Pluie précédente mm.	Écart de temps	Pluie étudiée			Infiltration	
		mm.	durée	mm/h.	mm.	mm/h.
8.3-5.8	48 h.	13	27'	29	9.4	20.9
1.0	48 h.	20.5	1 h.25'	14.8	18.9	13.4
20.5	24 h.	4.8	45'	6.4	4.8	6.4+
		21.2	5 h.30'	3.9	17.8	3.3
26	72 h.	6.3	15'	25.2	3.7	14.8
		10.6	1 h.10'	7	9.4	6.3
16.9	24 h.	18.3	1 h.15'	14.6	13.8	11
		8.7	1 h.30'	5.8	8.7	5.8
14.6-13.1	12 h.	8.7	40'	13	6.6	10
		4	45'	5.3	4	5.3+
		1.2	35'	3.4	1.2	3.4+

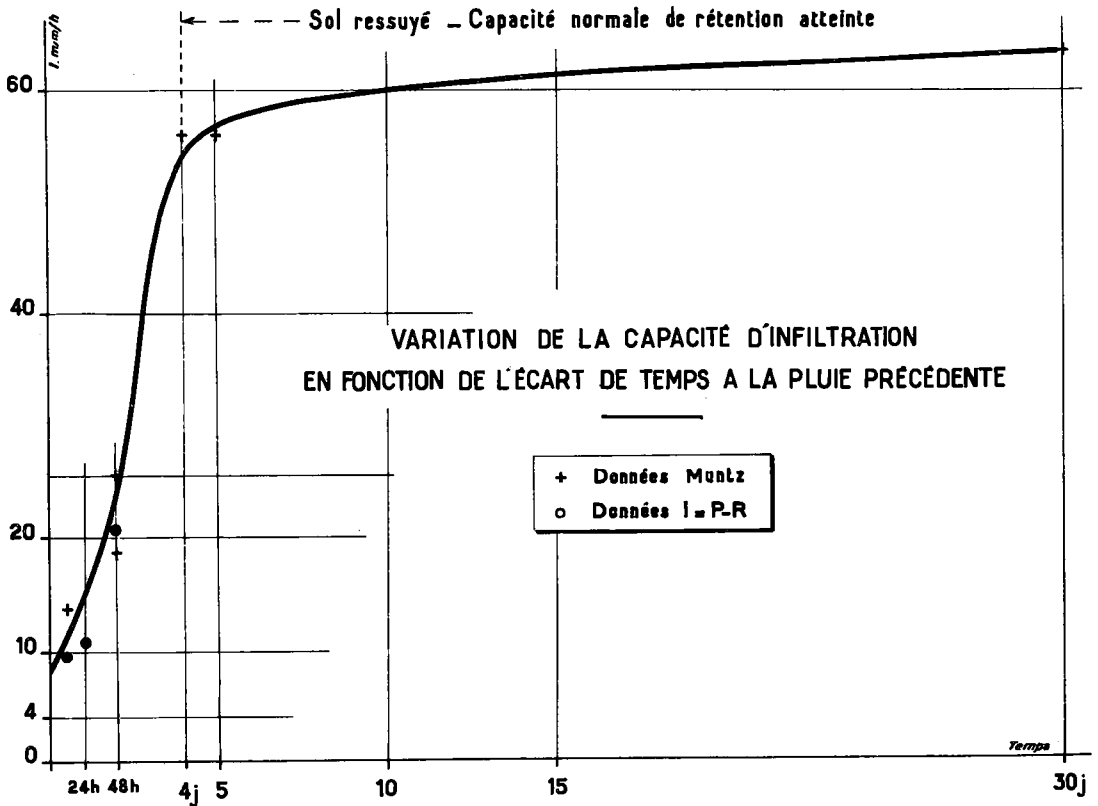
Quand l'infiltration est égale à la pluie (pas de ruissellement) la capacité d'infiltration est supérieure à la quantité d'eau infiltrée.

Les valeurs obtenues ici concordent avec les résultats MUNTZ; en les groupant (1), nous avons tracé (graphique 3) la courbe de variation de la capacité d'infiltration du sol, lors d'une tornade, en fonction du temps qui sépare cette tornade de la pluie antérieure.

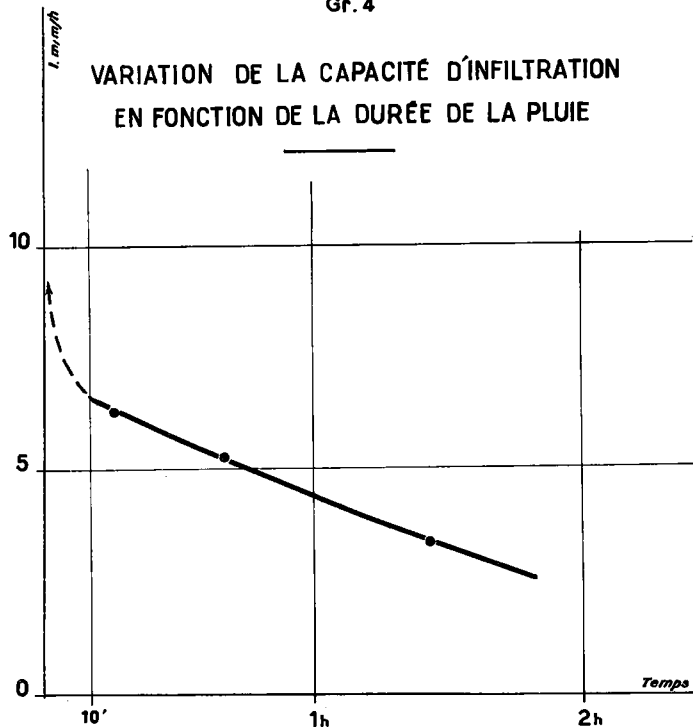
(1) Nous pouvons le faire puisque l'évaporation est négligeable et la couverture végétale faible.

Les averses à intensités différentes permettent de tracer (graphique 4) la courbe de variation de l'infiltration pendant une tornade, l'origine des temps étant le début de la tornade. Si la courbe du graphique 3 est satisfaisante, la courbe du graphique 4 est encore imprécise vers l'origine. Il faudrait obtenir des diagrammes beaucoup plus précis que ceux que nous avons établis avec le pluviographe.

Gr. 3



Gr. 4



F - BILAN HYDROLOGIQUE

1°) Coefficients d'écoulement :

Le tableau ci-dessous donne les coefficients d'écoulement pour les 28 crues : 16 connus et 12 établis par comparaison :

Mois	0 à 5 %	5 à 10 %	10 à 20 %	20 à 30 %	30 à 40 %	40 à 50 %
Juin	1					
Juillet	10		2	1		
Août	1	5	4			1
Septembre	2				1	
	19		6	1	1	1

Notons, d'une part que le coefficient d'écoulement varie très fortement en fonction :

1° - de la forme du hétéogramme,

2° - de la durée de la période séparant l'averse étudiée de l'averse précédente,

d'autre part, que pour les très fortes averses des coefficients de l'ordre de 50 % sont tout à fait vraisemblables.

Bien que ne disposant que d'une année d'observation, nous donnons les coefficients d'écoulement mensuels :

Juin	0,25 %	Septembre	16,7 %
Juillet	11,2	Octobre	0,0
Août	18,7	Année 1954	14,2 (103 mm. de lame d'eau)

Ces coefficients sont gonflés par la présence de une à deux grosses crues. Le coefficient annuel de 14,2 % correspond à ce qui est observé en moyenne sur les grands bassins de la même zone climatique et avec le même relief. L'importance des pertes tient au fait que les eaux infiltrées imbibent le sol et ne regagnent pas le talweg parce qu'il n'y a pas de nappes; elles s'évaporent en grande partie; en outre, l'évaporation des mouilles a une certaine influence puisqu'elle consomme l'eau provenant du ruissellement sur le bassin versant.

2°) - Essai de bilan hydrique :

En remarquant que les eaux nécessaires à la reconstitution de l'hygroscopicité du sol s'équilibrent d'une année sur l'autre et qu'il n'y a pas d'alimentation de nappe, on voit que les eaux de pluie se divisent en :

- écoulement (ruissellement superficiel et hypodermique).
- consommation des plantes (évapo-transpiration, formation de matière sèche).
- évaporation du sol et des mouilles après les pluies.

En admettant en première approximation que l'évaporation Colorado correspond à la capacité d'évaporation du sol imbibé, on peut dresser, à titre indicatif, le tableau suivant :

Mois	Pluie mm.	Lame eau écoulée	Capacité évaporat.	Evaporat. réelle	Excédent
Juin	53	0.1	140.9	52.9	
Juillet	240.5	26.9	113.3	113.3	100.3
Août	330	62	88.6	88.6	179.4
Sept.	84.5	14	124.2	70.5	
Octobre	19.6	0	207.5	19.6	
	727.6	<u>103</u>	674.5	<u>344.9</u>	<u>279.7</u>

L'excédent d'eau de pluie sur l'évaporation et l'écoulement en Juillet-Août correspondent à la quantité d'eau disponible pour les plantes ; ces 280 mm. sont très vraisemblables pour la faible végétation du bassin.

Le bilan en % de la lame d'eau de pluie serait donc :

- écoulement	14.2 %
- évaporation du sol et des mouilles	47.2
- consommation des plantes	38.5

G - CRUES MAXIMA DE 1954

Il y eut deux fortes crues :

- La crue du 28/8 est due à une pluie de 58 mm. en 45' (soit une intensité de 77 mm/h.); après 35' de montée, le lit du mayo, près du débordement, débita un maximum de 38.5 m³/sec., soit 10 300 l/sec/km². L'écoulement, qui dura 6 h., atteint le coefficient de 47.5 %.
- La crue du 1/9 est due à une pluie rabattue par les vents du Sud-Ouest sur le bassin; la hauteur des précipitations va du simple au double, en s'enfonçant dans le bassin : en moyenne 39 mm. en 1 h. Après 20' de montée, le maximum atteint fut de 27.5 m³/sec., soit 7 300 l/sec/km².

Les diagrammes de distribution de ces deux crues sont déformés par rapport au diagramme unitaire, tant pour leur gradient de montée plus fort que pour leur longue durée de pluie, donnant une courbe de débit en "S".

Bien que l'intensité de la pluie du 28/8 soit assez remarquable, il n'est pas possible d'affirmer que la crue résultante est exceptionnelle, ni d'évaluer sa probabilité. Peut-être que cette probabilité est plus faible que l'annuelle, mais elle n'est sûrement pas décennale. Nous avons essayé d'évaluer la crue que produirait sur le BOULORÉ une pluie unique de 135 mm. en 2 h., telle que celle d'août 1950 à FORT-LAMY. L'étude de la capacité d'infiltration et de l'intensité de la pluie nous donne un coefficient de 69 % environ. Nous avons établi la courbe de crue en additionnant l'hydrogramme unitaire (pour 67.5 mm/h.) avec lui-même, autant de fois que la pluie efficace contenait d'unité de temps (7'), soit onze fois. La courbe en "S" obtenue est toujours croissante, elle n'atteint pas le palier; le maximum atteint au bout de 1 h.24 est de 67 m³/sec., soit 17,8 m³/sec/km². Tel serait le maximum de crue de probabilité comprise entre 1/ 10 et 1/50.

Ce chiffre de 17.8 m³/sec. ne doit être considéré que comme un ordre de grandeur. Le tarage de la station par formule est insuffisant pour permettre en toute sûreté de fortes extrapolations; l'estimation de l'infiltration pour des averses de cet ordre est également bien aléatoire.

CONCLUSIONS

Rappelons la difficulté d'appliquer la méthode des hydrogrammes unitaires aux petits bassins (unité de temps = 7', averse unitaire rare), la carence fréquente des enregistreurs, le caractère sommaire du tarage de notre station et le fait qu'une année d'observation ne suffit pas pour conclure. Nous pouvons cependant avancer déjà un certain nombre de résultats utilisables dans le domaine de l'application pratique :

- pas d'écoulement en dessous de 5 mm. de pluie
- au-dessus de 5 mm., c'est le diagramme d'intensité de la pluie qui conditionne l'importance de l'écoulement
- le coefficient d'écoulement est fonction de l'intensité de la pluie; il est peut-être représentable par un faisceau de courbes fonction de la durée de la pluie efficace
- la pointe de crue est fonction de l'intensité de la pluie et déterminable en première approximation avec le diagramme de distribution du bassin
- le coefficient d'écoulement peut atteindre 50 % pour des fortes crues
- des débits spécifiques de l'ordre de 3 000 l/sec/km² peuvent être atteints plusieurs fois par an pour d'aussi petits bassins, 10 000 l/sec/km² une fois tous les ans ou tous les deux ans, 15 000 l/sec/km² une fois tous les dix ou vingt ans. Ces chiffres, qui seront précisés après une seconde campagne, ne sont que des ordres de grandeur.