

DETERMINATION des DEBITS de CRUES EXCEPTIONNELLES
à partir des RESULTATS de BASSINS EXPERIMENTAUX

Par J. RODIER

Ingénieur en Chef à Electricité de France

Chef du Service Hydrologique de
l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer

Coordinateur du Réseau de Correspondants de
la Commission de Coopération Technique en Afrique au Sud du Sahara
pour l'Hydrologie

ORSTOM
HYDROLOGIE
DOCUMENTATION

70940

Août 1960

ORSTOM Fonds Documentaire
N° : 33 372
Cote : B

La construction de nombreux ouvrages tels que ponts routiers ou ferroviaires, petits barrages, prises d'eau pour adduction d'eau, rend nécessaire la détermination des débits des crues les plus fortes que peuvent présenter les petits cours d'eau.

En fait on peut admettre, en général, des conditions moins sévères : ces aménagements peuvent être fortement endommagés ou même détruits par une crue de probabilité faible. Le coût de ces petits ouvrages n'est pas très élevé et, dans la plupart des cas, leur rupture n'est pas susceptible d'entraîner la perte de vies humaines. Dans ces conditions, on peut envisager que les projets soient établis de telle façon qu'une crue de période de retour relativement courte, souvent dix ou vingt ans, parfois cinquante ou même cent ans, ne provoque aucun dommage. Ces conditions ne sont pas comparables à celles auxquelles sont soumis la plupart des grands barrages pour lesquels les périodes de retour de la crue exceptionnelle à prendre en considération doivent atteindre mille ou plutôt dix mille ans.

Il est fort heureux que les fréquences à envisager sur les petits cours d'eau soient relativement élevées car nos connaissances sont très faibles, surtout en AFRIQUE, sur les caractéristiques hydrologiques de cette nature. Les petits cours d'eau dont les débits ou même les hauteurs ont été observés depuis longtemps sont extrêmement rares et même dans ce cas, on ne peut pas tirer grand parti des observations brutes car les crues sont très courtes et les lits variables, ce qui rend difficile, a posteriori, l'estimation du débit maximum d'une crue donnée. En règle générale, il ne faut donc pas espérer pouvoir calculer les crues exceptionnelles par analyse statistique directe des débits observés, comme on peut le faire sur les cours d'eau plus importants. En outre, les débits spécifiques de crues varient beaucoup d'un bassin à un autre et la transposition des résultats obtenus à d'autres cours d'eau est particulièrement incertaine sans données approfondies sur les divers facteurs du ruissellement.

Ce sont ces difficultés qui ont interdit pendant longtemps toute étude de crue sur les petits cours d'eau africains. En l'absence de données directes, on a utilisé longtemps, dans l'Afrique de l'Ouest, les normes européennes en prévoyant parfois une marge de sécurité supplémentaire. Les résultats ont été souvent satisfaisants car les études ultérieures ont prouvé que sur d'immenses

étendues, les crues sont relativement faibles : par exemple dans les régions forestières ou sur les cuirasses latéritiques démantelées. Il était même fréquent que les débouchés des ouvrages soient surabondants.

Mais peu à peu le développement de l'infrastructure a imposé la notion de rendement, ce qui a conduit à serrer de plus près les normes européennes ; d'autre part, le réseau routier s'est étendu dans des zones plus difficiles et les destructions de ponts par les crues sont devenues plus fréquentes. Nous connaissons certaines routes pour lesquelles tous les petits ouvrages ont été emportés dès la première année. Parallèlement, les petits barrages se sont multipliés et les destructions ont été plus nombreuses et plus coûteuses aussi. A tel point que des études systématiques se sont avérées indispensables.

PRINCIPES des ETUDES de CRUES EXCEPTIONNELLES -

Il semblait tout indiqué d'appuyer cette étude sur l'observation des précipitations et des relations entre précipitations et débits car, pour les petits cours d'eau, ces relations sont de nature plus simple que sur les grands bassins.

L'étude des précipitations nécessite :

- a) L'observation et l'analyse des précipitations ponctuelles.
- b) L'étude de la répartition de l'intensité dans le temps au cours de l'averse.
- c) L'étude de la répartition des précipitations dans l'espace.

La première partie de cette étude peut être facilement effectuée par les Services Météorologiques.

La seconde et la troisième supposent des études hydro-météorologiques qui peuvent être effectuées par les hydrologues sur les bassins expérimentaux dont nous parlerons ci-après.

L'analyse des résultats obtenus permet de définir l'averse de fréquence correspondant à celle de la crue dont on doit se protéger ; supposons que cette fréquence est décennale.

L'averse décennale est caractérisée par :

- La hauteur de précipitation ponctuelle décennale, facile à déterminer par la méthode des stations-années.
- Le rapport entre la hauteur de précipitation ponctuelle et la hauteur moyenne sur le bassin versant.
- Le diagramme de variation dans le temps des intensités de précipitations correspondant à ce type d'averse et à son ordre de grandeur. Un autre rapport donne quelques indications sur la façon d'obtenir ce diagramme.
- Le degré de saturation du sol : ce dernier facteur est caractérisé suivant le régime du cours d'eau, soit par le débit de base Q_0 avant la crue, soit par la dernière précipitation antérieure, soit par l'ensemble des précipitations antérieures pendant une période donnée : la semaine ou le mois précédent par exemple.

Pour la recherche des relations entre précipitations et débits, on pourrait être tenté d'utiliser des lysimètres, mais si ces appareils sont souvent de bons instruments pour déterminer, sur un sol cultivé, les valeurs de l'infiltration et de l'évapotranspiration, ils ne se prêtent pas à l'étude fine du ruissellement sur un bassin naturel, même lorsqu'ils sont conçus pour la mesure de l'écoulement superficiel. Par contre, le bassin expérimental permet d'obtenir des résultats satisfaisants dans la plupart des cas.

Il s'agit d'obtenir pour chaque averse : la courbe de variations des débits à la station principale, le réseau d'isohyètes donnant la répartition dans l'espace de la hauteur de l'averse et le diagramme des intensités de l'averse en deux points au moins du bassin. Suivant le nombre d'averses observées chaque année, on doit poursuivre les études sur le terrain pendant trois ou quatre ans.

En AFRIQUE, les installations à prévoir peuvent être fort simples. Les seuls appareils coûteux consistent en un appareil enregistreur des débits, deux pluviographes enregistreurs et un moulinet hydrométrique. La station de jaugeage doit être équipée de façon économique : une passerelle en tubes démontables suffira dans de nombreux cas. Si les débits de crues les plus élevés à mesurer ne dépassent pas 4 à 5 m³/s (140 à 175 cu ft/s) et si le bois est peu coûteux, on peut construire un venturi, ce qui réduit le nombre de mesures de débits à quelques contrôles et rend la surveillance plus facile. Les travaux de maçonnerie doivent être réduits au minimum : bande de béton, si il y a lieu, pour stabiliser le lit ou une légère amélioration d'un déversoir naturel, le blocage des tubes du limnigraphe. Il faut absolument éviter l'aménagement de stations de jaugeages régulières comme celles que l'on

peut voir en EUROPE. En effet, de telles stations devraient résister à une crue exceptionnelle, que d'ailleurs on ne connaît pas et, dans ces conditions, les précautions à prendre sont à peu près les mêmes que pour une véritable prise d'eau, d'où un prix prohibitif. Ce qui coûte le plus cher, sur un bassin expérimental africain, ce sont les charges de salaires et indemnités diverses de l'agent technique responsable : celui-ci doit cumuler, en effet, compétence technique suffisante, esprit d'initiative, santé sans défaillance et surtout conscience professionnelle à toute épreuve. Le bassin expérimental doit donner des résultats quelles que soient les circonstances et surtout les défaillances du matériel. L'ingénieur hydrologue dirige les travaux d'aménagement, prépare le programme, conseille les agents techniques placés sous ses ordres, organise le dépouillement et interprète les résultats bruts. Mais quels que soient les trésors d'ingéniosité qu'il pourra déployer dans la dernière partie de ce travail, il lui sera impossible de suppléer aux observations défaillantes. Le rôle de l'agent technique responsable est donc essentiel et on ne peut garder un tel personnel qu'avec des salaires suffisants.

L'ensemble des résultats obtenus sur le bassin expérimental est mis au net sous forme de cartes d'isohyètes pour chaque averse, de hyétogrammes moyens et d'hydrogrammes de crues.

On ne peut guère passer d'une averse à une crue donnée que si l'écoulement s'effectue sous forme de ruissellement superficiel et, dans certains cas, sous forme d'écoulement hypodermique. Ce sont presque toujours ces formes d'écoulement que l'on rencontre dans le cas des crues exceptionnelles.

Il faut connaître pour établir l'hydrogramme de ruissellement :

- 1°) La forme type de l'hydrogramme de ruissellement, ou plus précisément, le diagramme de distribution.
- 2°) Le volume de ruissellement produit par une averse donnée, ce qui suppose déterminer soit le coefficient de ruissellement, soit la capacité d'absorption.

Le diagramme de distribution est assez facile à établir par la méthode des hydrogrammes unitaires à partir des hydrogrammes observés. Il convient, cependant, dans certains cas, de n'utiliser à cet effet que les hydrogrammes correspondant à de fortes crues.

Le coefficient de ruissellement ou la capacité d'absorption sont beaucoup plus difficiles à calculer, car ils dépendent de très nombreux facteurs : hauteur de l'averse, forme du hyétogramme (notamment, la hauteur de "pluie utile"), intensité maximale,

position de l'épicentre de l'averse, état de saturation du sol, degré de croissance de la végétation. C'est pourquoi, si l'on porte sur un diagramme le coefficient de ruissellement en fonction du facteur qui exerce la plus forte influence, la hauteur de pluie utile par exemple, on obtiendra un nuage de points assez lâche, la dispersion étant due, non pas à des erreurs de mesures, mais surtout au fait que l'on néglige les autres facteurs. Cependant, il ne faut pas oublier que, pour le calcul de la crue décennale, tous les facteurs autres que la hauteur de précipitation ponctuelle maximale (qui est décennale) sont des valeurs médianes correspondant à des précipitations d'ordre décennal. Les valeurs cherchées doivent donc être situées vers le centre du nuage de points. Dans ces conditions, on parvient sans trop de difficulté, pour la hauteur de pluie décennale, à donner une "fourchette" des valeurs du coefficient de ruissellement ou de la capacité d'absorption en dressant un tableau général des crues fortes et moyennes réellement observées, tableau sur lequel on portera tous les facteurs du ruissellement. Une méthode simple, imaginée par M. A. BOUCHARDEAU permet, dans le cas des terrains perméables, homogènes ou non, d'extrapoler les valeurs des capacités d'infiltration grâce à des mesures systématiques de la perméabilité du sol en place, après avoir tenu compte de l'état de saturation du sol.

L'exemple ci-dessous illustre le mode de calcul d'une crue exceptionnelle sur le bassin expérimental du LEYOU (République du CONGO). L'analyse statistique des précipitations a donné, pour l'averse décennale, les caractéristiques suivantes :

- Précipitation ponctuelle : 130 mm (5.1 in.)
- Etat de saturation, défini par l'écart de la pluie précédente : 3 jours.

L'étude des bassins expérimentaux a montré que le coefficient de réduction entre hauteur de précipitation ponctuelle et hauteur moyenne sur 6 km² (1,485 acres), superficie du bassin, est de 0,90. L'étude des fortes précipitations montre que la pluie utile dure une heure. L'analyse des hydrogrammes permet de conclure qu'une telle averse est unitaire. Il résulte de l'interprétation des averses observées que pour une averse moyenne de :

$$130 \text{ mm} \times 0,90 = 117 \text{ mm} \quad (5.1 \times .90 = 4.6 \text{ in.})$$

le coefficient de ruissellement serait compris entre 8,5 et 12 %. Par prudence, nous adopterons 11 %. Le volume de ruissellement est donc :

$$V_R = 0,117 \times 0,11 \times 6 \times 10^6 = 77 \text{ 000 m}^3$$
$$\underline{(4.6 \times 0.11 \times 1485 = 62.6 \text{ acre feet})}$$

La méthode des hydrogrammes unitaires appliquée aux hydrogrammes observés conduit à un diagramme de distribution tel que pour un volume de ruissellement de 10 000 m³ (8 acre feet), le débit maximal est de 0,8 m³/s (22.7 cusec).

Le débit maximal de ruissellement de la crue décennale est donc égal à :

$$\frac{0,8 \times 77\ 000}{10\ 000} = 6,15\ m^3/s$$

$$\frac{22,7 \times 62,6}{8} = 217\ cusec$$

On peut estimer à 0,35 m³/s (12.3 cusec) l'ensemble du débit de l'écoulement hypodermique et débit provenant des nappes souterraines.

Le débit de la crue décennale cherché sera donc de :

$$\underline{6,50\ m^3/s} \quad (230\ cusec)$$

MISE en OEUVRE de La METHODE -

Bien entendu, il n'est pas possible, chaque fois que l'on veut construire un ouvrage sur un petit cours d'eau, d'installer un bassin expérimental et de l'exploiter pendant trois ans en vue d'effectuer le calcul cité plus haut. Le prix des études serait supérieur au prix de l'ouvrage. Il faut tout d'abord que dans chaque Etat, un certain nombre de bassins expérimentaux fournissent des bases solides pour les divers types de climat, de sol, de couverture végétale etc ... Une fois ce travail achevé, si l'on veut calculer la crue exceptionnelle sur un bassin donné, on pourra, suivant le temps et les crédits dont on dispose, procéder à une visite du bassin en étudiant pente, perméabilité, couverture végétale, réseau hydrographique ou mieux observer simultanément précipitations et débits pendant une seule campagne. Il sera alors possible de classer le bassin par rapport aux catégories déjà étudiées, ce qui permettra d'obtenir tous les éléments nécessaires au calcul qui a été présenté plus haut.

A priori, l'investissement représenté par un ensemble de bassins expérimentaux peut paraître considérable. Il n'en faudrait pas moins d'une dizaine pour certains Etats africains. Mais il y a deux moyens d'alléger cette charge.

- 1°) Les résultats sur bassins expérimentaux se prêtent remarquablement à la transposition. Un Etat peut donc utiliser les données recueillies sur des bassins expérimentaux des Etats voisins, ce qui suppose, comme pour de nombreux problèmes d'hydrologie, une certaine collaboration entre hydrologues africains.
- 2°) Presque toute étude hydrologique pour un projet important doit comporter un ou plusieurs bassins expérimentaux. Il suffit d'équiper ceux-ci pour l'observation des crues, ce qui ne constitue pas un gros supplément de dépenses.

Ces études peuvent d'ailleurs être effectuées par étapes, le personnel et le matériel affectés à un ensemble de bassins étant employés à une autre série de bassins dont l'étude est moins urgente, après une première période de trois ans.

Pour les anciens Etats français de l'AFRIQUE de l'Ouest, par exemple, correspondant à une superficie de 5 000 000 Km² (2 000 000 Sq. miles), 14 bassins avaient été prévus spécialement pour des études systématiques de crues. En fait, grâce aux études faites en vue d'aménagements ou d'ensembles d'aménagements particuliers, il a été possible d'exploiter 38 bassins, ce qui est presque suffisant. On trouvera en annexe les tableaux donnant les résultats provisoires arrêtés au 30 Juillet 1960.

Bien entendu, il est également nécessaire que les Services Météorologiques fournissent sur les caractéristiques des averses des données suffisantes. Pour les petits cours d'eau, encore plus que pour les rivières et les fleuves, il n'est pas possible de procéder à des études sérieuses sans un bon réseau d'observations pluviométriques.

CRUES DECAENNALES SUR QUELQUES BASSINS D'AFRIQUE OCCIDENTALE

I - Zones désertiques et sahéliennes (A = 25 Km²) 10 Sq. miles

Bassin	Régime hydrologique	Pente	Terrains superficiels	Précipitation annuelle mm inches	Fluie décaennale ponctuelle mm	Crus décaennaux 1/8 Km ² Cu ³ /sec/Sq. mile
KOURIEN-DOULIEN	désertique	forte	grès imperméable	100 (4 in.)	50 (2 in.)	5 000 à 7 000 (68 to 95)
BACHIKELE	désertique	forte	grès imperméable	150 à 200 (6 to 8")	56 (2.2")	7 000 à 9 000 (95 to 123)
QUED ALI	subdésertique	assez forte	grès imperméable	230 (9")	82 (3.2")	4 500 à 5 500 (61 to 75)
TIN-ADJAR	subdésertique	modérée (1)	quartzite + argile imperméable	300 (12")	95 (3.7")	3 500 (48)
DIONABA secondaire	subdésertique	modérée	schistes décomposés légèrement perméables	300 (12")	92 (3.6")	800 à 1 000 (11 to 14)
CAGARA Est	sahélien	très faible	argile imperméable	450 (18")	95 (3.7")	1 500 (20)
CAGARA Ouest	sahélien	modérée	légè perméable sur granite	450 (18")	93 (3.7")	3 000 (41)
OUADI-KAOUN	sahélien	faible	perméable	500 (20")	86 (3.4")	800 à 1 200 (11 to 16)
OUADI ABOU GOULEM	sahélien	assez forte	assez perméable	500 (20")	86 (3.4")	3 500 (48)
MAGGIA	sahélien	assez forte	argile imperméable + latérite	520 (20.5")	85 (3.3")	6 000 à 7 000 (82 to 95)
KOUMBAKA	sahélien	assez forte	grès imperméable	600 (24")	100 (3.9")	8 000 à 10 000 (109 to 136)

(1) La chaîne des quartzites assez perméable n'est pas comprise dans l'évaluation de la pente.

II - Zones de savane (A = 25 Km²) 10 Sq. mi.

Bassin	Régime hydrologique	Pente	Terrains superficiels	Végétation	Précipitation annuelle mm inches	Pluie décennale pouces mm	Crus décennaux l/s.km ² CuSec/Sq. mi.
BOULORE	tropical	très forte	argile imperméable	savane mixte clairsemée	800 32"	120 4.7"	8 000 à 10 000 109 à 136
BARLO	tropical	forte	décomposition de granite perméable	savane mixte clairsemée	800 32"	107 4.2"	4 000 à 5 000 55 à 68
DOUNFING	tropical	assez forte	latérite très perméable	savane claire guinéenne	1 000 39"	120 4.7"	1 500 à 1 800 80 à 25
FLAKOHO	tropical de transition	modérée	latérite perméable	savane guinéenne	1 350 53"	135 5.3"	1 600 à 2 000 28 à 24
TERO	tropical de transition	modérée	latérite perméable	savane guinéenne	1 350 53"	135 5.3"	1 200 à 1 500 16 à 20
DIALABO	tropical de transition	modérée	latérite perméable	savane guinéenne dégradée	1 700 67"	140 5.5"	1 100 à 1 200 15 à 16
MAYONKOURE	tropical de transition	forte	grès assez perméable	savane boisée	2 100 83"	160 6.3"	2 000 27
NGOLA	tropical de transition	forte	sables très perméables	savane boisée dense	1 600 63"	140 5.5"	400 à 500 5 à 7
GNBA	équatorial	forte	argile imperméable	pseudo-steppe	1 400 55"	130 5.1"	4 500 à 5 500 61 à 75
LHOTO	dahoméen	forte	arènes très perméables	savane boisée dense	1 150 45"	130 5.1"	1 000 à 1 200 14 à 16
KOLOMANDJE	dahoméen	modérée	latérite perméable	savane boisée	1 150 45"	130 5.1"	1 200 à 1 400 16 à 19
Plateaux Batékés	équatorial	modérée	sols extrêmement perméables	pseudo steppe	1 500 59"	130 5.1"	60 .8

III - Zones forestières (A = 25 Km²) - 10 Sq. miles

Bassin	Régime Hydrologique	Pente	Terrains superficiels	Végétation	Précipitation annuelle (mm)	Pluie décennale ponctuelle (mm)	Crue décennale (1/s.Km ²)
							(en Sec/Sq. mile)
IFOU	équatorial	faible	soils ferrallitiques perméables	forêt dégradée	1 200 47"	150 5.2"	400 à 600 5.5 to 8.2
BI BANGA	équatorial	faible	soils ferrallitiques assez perméables	forêt	1 800 71"	130 5.1"	200 à 300 2.7 to 4.1
LEYOU	équatorial	forte	soils ferrallitiques assez perméables	forêt	1 800 71"	130 5.1"	600 à 800 8.2 to 11
LOUE	tropical de transition	très forte	perméabilité moyenne	forêt	2 200 87"	200 7.9"	1 500 à 2 000 20 to 27
NION	tropical de transition	très forte	perméabilité moyenne	forêt très dégradée	1 800 71"	175 6.9"	1 200 à 1 800 16 to 25
SITOU	équatorial	assez forte	perméabilité faible	forêt très dégradée	1 700 67"	160 6.3"	2 100 à 2 300 29 to 31
BAFO	équatorial	assez forte	perméabilité faible	forêt moins dégradée	1 700 67"	160 6.3"	1 400 à 1 700 19 to 23

IV - Zones urbaines

Bassin	Régime hydrologique	Pente	Terrains superficiels	Végétation	Précipitation annuelle mm in.	Pluie décennale ponctuelle mm	Crus décennale l/s.Km ² Cusec/Sq. mile
FRAZZAVILLE	équatorial	assez forte	sables imperméables	cité africaine	1 500 59"	150 5.9"	4 000 à 6 000 55 to 82
TCHINOUKA	équatorial	faible	sables semi-perméables	moitié cité africaine, moitié savane	1 250 49"	160 6.3"	300 à 500 4.1 to 6.8
HAUTE SONGOLO	équatorial	assez forte	sables très perméables	peu d'habitation, savane	1 250 49"	100 6.3"	50 .7