

## Contribution à la méthodologie de l'évaluation des débits de crue maximaux en cas d'insuffisance de données

J. Rodier

Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer  
Paris, France

**SUMMARY:** The author presents the methods which are used in the Hydrological Service of the ORSTOM for rainfall floods in Africa, on islands of the Indian Ocean and in the Pacific.

The management and the study of numerous representative basins have enabled establishment of general methods for determining the elements of the rainfall-runoff relations and for estimating floods on small basins without observational data.

It is possible to transfer these methods to other regions provided that some adjustments are made to the rainfall and flood regimes.

The relations between the decennial or centennial floods and median floods for large basins in Central Africa are determined. With adjustments for natural conditions they are applied to basins with few records.

For medium basins the method of isochrones is used, especially for maximum possible floods and for the case of a cyclonic regime. In this case the envelop curves are used as well.

**RÉSUMÉ :** L'auteur présente les méthodes utilisées dans son Service pour les crues pluviales en Afrique, dans les Iles de l'Océan Indien et du Pacifique.

Pour les petits cours d'eau, l'aménagement et l'étude de nombreux bassins représentatifs ont permis d'établir des règles générales pour déterminer les éléments de l'opérateur pluie-débit et, par suite, pour le calcul de la crue d'un petit bassin non observé. Sous réserve de quelques vérifications sur le régime des pluies et sur les crues, il est possible d'étendre ces diagrammes à d'autres régions.

Pour les grands bassins connus d'Afrique Noire, les rapports entre crues décennales ou centenaires ou crues médianes ont été établis. On les applique avec corrections suivant les conditions naturelles aux bassins mal connus.

Pour les bassins moyens, on utilise la méthode des isochrones, surtout pour la crue maximale possible et pour les cas de régimes cycloniques. Dans ce cas, on emploie également les courbes-enveloppes.

Évaluer un débit de crue maximal pour un aménagement, à partir de données de base insuffisantes, est une des tâches les plus désagréables qui soient imposées à l'Hydrologue. L'ingénieur le pousse à ne pas prendre de trop grandes marges de sécurité qui risqueraient d'alourdir les charges de construction et parfois «tuer» le projet, par contre, sa propre expérience lui indique que l'on pêche presque toujours par optimisme et que la crue «extraordinaire», observée il y a peu de temps, se produit en fait beaucoup plus souvent qu'on ne le croit.

Cette situation difficile se présente souvent dans les régions tropicales et méditerranéennes et, l'ayant rencontrée à de nombreuses reprises sans parvenir toutefois à nous y habituer, nous nous sommes permis de présenter ci-après les maigres résultats de notre expérience.

Indiquons tout d'abord que la notion : données insuffisantes est moins nette qu'on ne le croit; pour certains régimes tropicaux faciles, une dizaine d'années d'observations pour une station hydrométrique située au milieu d'un réseau très lâche fournit un ensemble de données très appréciables, alors qu'en régime méditerranéen très irrégulier, évaluer un débit de crue maximal à partir de la même période de dix ans est une aventure.

Pour le cas où effectivement les données sont insuffisantes, nos conclusions sont les suivantes :

- 1) Il n'y a pas de méthode miracle et pas de méthode unique, mais diverses recettes à employer avec discernement dans chaque cas particulier et dont les résultats doivent être vérifiés autant que possible par plusieurs voies différentes.
- 2) Il importe de comprendre le mécanisme de formation des crues exceptionnelles et ceci est beaucoup plus important que dans le cas de données suffisantes. Il faut donc étudier les précipitations susceptibles de produire ces crues exceptionnelles et les phénomènes aérologiques qui leur donnent naissance. Ceci n'est pas impossible, en général, car ces perturbations couvrent d'assez vastes superficies et sont donc étudiées correctement dans au moins une partie de la zone qu'elles couvrent. Il suffit donc de déterminer de façon peut-être qualitative le type de perturbation produisant ces averses exceptionnelles, de rechercher dans les régions voisines ou les pays voisins où ce type d'averse a été étudié, s'il existe des données utilisables et enfin de transposer les résultats concernant les précipitations au bassin à étudier.
- 3) Dans le même esprit, il faut étudier à fond le mécanisme de transformation des pluies en débits, à partir des rares données dont on dispose ou plutôt à partir d'une étude hydrométéorologique durant au moins une saison des pluies, sur le terrain. Il importe d'étudier plus particulièrement le rapport entre volume des précipitations et volume écoulé correspondant et la vitesse de propagation des crues ou la forme de l'hydrogramme qui dépend de cette vitesse.

Suivant les dimensions des bassins à étudier les procédés employés pour l'évaluation des crues maximales diffèrent :

## 1. PETITS COURS D'EAU

De façon générale pour ce type de cours d'eau la crue est due à une averse très forte de moins de 24 heures rencontrant d'excellentes conditions d'humidité préalables.

Du point de vue de l'étude des crues, l'irrégularité spatiale des précipitations joue un très grand rôle. Pour des averses orageuses très irrégulières on pourra, par exemple, admettre que l'averse est à peu près homogène pour  $2 \text{ km}^2$  alors que s'il s'agit de types d'averses continues telles que certaines averses à caractères cycloniques, on peut considérer parfois que l'averse est homogène sur plusieurs centaines de  $\text{km}^2$ . La notion de petit cours d'eau est donc liée, dans une certaine mesure, à l'irrégularité spatiale et varie d'une région à l'autre; cependant on ne choquera pas trop d'hydrologues si pour fixer les idées on précise qu'un petit cours d'eau a un bassin de superficie inférieure à  $500 \text{ km}^2$ .

Les données statistiques directes sur les débits provenant de bassins si petits sont généralement très rares dans les pays en voie de développement. Fort heureusement, les ouvrages qui doivent y être aménagés ne sont pas très coûteux en général et leur destruction ne présente que rarement le caractère de catastrophe (sauf en certains pays de montagne). En conséquence les fréquences pour lesquelles les crues sont à calculer sont généralement comprises entre fréquences décennales et fréquences cinquantennaires.

Un mode d'estimation peu orthodoxe, mais commode, consiste à supposer que l'averse décennale et cinquantenaire produit dans *certaines conditions* la crue décennale ou cinquantenaire, on est donc ramené à une étude de statistique des averses ponctuelles en une station du bassin ou une station qui, comme *on doit le vérifier*, présente le même régime. On doit ensuite déterminer le mécanisme de transformation des hauteurs de précipitations en débits et en déduire la crue décennale ou cinquantenaire.

Le procédé le plus simple à utiliser est celui de l'hydrogramme unitaire. Il suppose que l'averse est à peu près homogène sur le bassin c'est-à-dire que celui-ci est inférieur

à une certaine limite variable comme on l'a vu plus haut avec le régime des pluies. En Afrique tropicale on considère que cette limite varie entre 10 et 25 km<sup>2</sup>, à la rigueur on va quelquefois jusqu'à 100. On doit passer de la pluie ponctuelle de fréquence décennale à la hauteur moyenne de fréquence décennale sur le bassin étudié, qui est un peu plus faible, par un coefficient de réduction, *k*, qui présente les valeurs suivantes :

0	< S < 25 km <sup>2</sup>	K = 1		
25 km <sup>2</sup>	< S < 50 km <sup>2</sup>	K = 0,95	100 km <sup>2</sup>	< S < 150 km <sup>2</sup> K = 0,85
50 km <sup>2</sup>	< S < 100 km <sup>2</sup>	K = 0,90	150 km <sup>2</sup>	< S < 200 km <sup>2</sup> K = 0,80

On suppose, bien entendu, des conditions d'humidité antérieures moyennes pour la saison des pluies, on choisit alors un coefficient de ruissellement, rapport des hauteurs d'eau ruisselées à la hauteur moyenne de précipitations et les éléments de l'hydrogramme correspondant. Pour l'Afrique à l'ouest du Congo, il a été établi à partir d'études sur bassins représentatifs une série de diagrammes donnant directement en fonction de la couverture végétale, d'un indice de perméabilité et d'un indice de pente, le coefficient de ruissellement et le temps de base de l'hydrogramme de ruissellement (durée du ruissellement), ceci pour l'averse décennale tombant dans des conditions d'humidité moyenne; on a également déterminé le rapport entre débit maximal de ruissellement et débit moyen de ruissellement calculé pour la durée du temps de base.

De tels diagrammes existent dans certaines régions du monde, certains ont même donné lieu à des formules comme celle de Snyder, mais tous ont été mis au point en fonction des conditions naturelles bien déterminées. Les recherches des hydrologues permettront plus tard d'étendre ces résultats à de nombreuses régions, mais en attendant il convient de vérifier si les conditions naturelles du bassin se rapprochent de celles pour lesquelles diagrammes ou formules ont été établis et de vérifier, comme on le peut, s'ils s'appliquent dans la région où l'on a à calculer la crue avant de procéder au calcul.

L'idéal serait de procéder à une série de mesures simultanées des pluies et des débits pendant un an ou deux sur le bassin à étudier mais, si l'ouvrage à construire n'est pas important, le prix de cette étude est supérieur au prix de la construction à envisager. Ceci ne peut être fait que si on envisage de construire toute une série de barrages ou de ponts dans la même région. Si ce n'est pas le cas, on doit procéder à une reconnaissance minutieuse du terrain, voir de très près le réseau hydrographique, interroger les riverains quand il y en a, mais rester très prudent : dans de nombreux cas la crue décennale peut passer à un niveau nettement supérieur à ce qu'on peut croire à l'examen des lieux, et les déclarations des riverains ne sont valables que si leur habitation est située très près du cours d'eau, si le plancher n'est pas trop haut au-dessus des plus hautes eaux, et il y a toujours dans ces enquêtes un élément subjectif. Cependant, on trouvera ainsi des recoupements précieux qui permettront de vérifier la validité des diagrammes et formules.

Lorsque le bassin est très petit : par exemple 1 km<sup>2</sup>, la pente forte et le sol imperméable, on peut admettre pour les fortes averses un coefficient de ruissellement de 90 à 95%. Si les précipitations de 24h sont exceptionnellement fortes, on peut se référer à la liste des plus fortes averses données dans le guide des pratiques hydrométéorologiques de l'OMM. Dans ce cas la valeur instantanée des débits n'est pas très importante, beaucoup moins que le volume de la crue, car on doit toujours tenir compte d'un certain amortissement de la crue dans le réservoir ou par la mise en charge des ponts ou buses.

Si le bassin est plus grand que 50 ou 100 km<sup>2</sup> (200 si les pluies sont bien réparties dans l'espace) le problème est plus difficile, il faut tenir compte non seulement de la hauteur moyenne de l'averse mais de la position de l'épicentre, la théorie de l'hydrogramme unitaire ne s'applique plus. On peut à l'extrême rigueur extrapoler avec prudence les débits spécifiques de crue décennale ou cinquantenaire obtenues pour de plus petits bassins, mais la méthode correcte serait la méthode des isochrones.

## 2. GRANDS BASSINS

On peut souvent leur donner comme limite inférieure  $10\,000\text{ km}^2$ , dans ce cas la crue exceptionnelle est due à un épisode pluvieux très abondant ayant duré au moins plusieurs jours et rencontré de bonnes conditions ou même à une saison des pluies exceptionnellement abondante. Elle peut également être due à la coïncidence fortuite des crues de deux affluents, crues qui ne seraient pas simultanées dans le cas général.

Les données disponibles sont plus abondantes que pour les petits bassins. Il est bien rare qu'on ne dispose pas de relevés de hauteurs d'eau ou même de débits pour un grand bassin de même régime et il est assez fréquent que l'on puisse bénéficier des relevés portant sur quelques années à une station du bassin à étudier.

En outre, la variabilité des régimes d'un bassin à un autre bassin voisin est plus faible que pour les petits cours d'eau.

Par contre, les fréquences des crues à étudier sont souvent plus faibles et pour les barrages elles devraient être théoriquement nulles dans presque tous les cas, c'est-à-dire qu'on doit déterminer un débit qui ne doit *jamaïs* être dépassé!

Comme pour les petits bassins, on recherche d'abord les causes de crues exceptionnelles et on examine le processus de transformation des pluies en débits.

Il convient de vérifier par la recherche de leurs causes si ces crues exceptionnelles sont ou ne sont pas du même ordre de grandeur que les fortes crues observées.

Les cas les plus courants où les crues exceptionnelles sont nettement «décallee» par rapport aux fortes pluies sont les suivants :

- 1) possibilités de pluies cycloniques ou provoquées par des typhons;
- 2) crues polygéniques avec éventualité peu fréquente de coïncidence de crue d'affluents principaux;
- 3) possibilités de pluie survenant sur de la neige en cours de fonte;
- 4) crues résultant de la création puis de la destruction de barrages naturels (Cordillère des Andes, Himalaya par exemple);
- 5) régions peu arrosées susceptibles de recevoir exceptionnellement des précipitations normales (cas fréquent : zone aride ou semi-aride).

S'il n'y a pas «décallee» nous utilisons les deux recettes suivantes :

a) Pour des périodes de retour inférieures à 500 ans et si les relevés portent sur 15 à 20 ans nous utilisons des ajustements de relations telles que celles de Gauss, de Galton ou de Pearson III. La distribution est souvent gaussique pour de grands cours d'eau tropicaux de plaine avec zones d'inondation, pas trop larges. Si les relevés portent sur moins de 15 ans, on compare les quelques valeurs de crues que l'on connaît aux résultats obtenus à des stations voisines mieux placées, ou quand on le peut on cherche à établir des corrélations entre débits de crues de cours d'eau voisins ou débits de crues et précipitations, mais souvent les données sur les précipitations ne portent pas sur une période plus longue que les débits de sorte qu'on ne peut pas remplacer l'étude statistique des débits par celle des pluies.

b) Pour la crue maximale : on estime la crue décennale d'après les relevés et les délaissés des fortes crues les plus récentes et on multiplie par un coefficient : rapport entre crue maximale et crue décennale, déterminé sur des bassins mieux connus de même régime et de même superficie. Ce coefficient est souvent voisin de 2 (ceci confirme la vieille habitude prise dans certaines administrations françaises de multiplier par 2 la plus forte crue connue pour de moyens cours d'eau). Il tend à croître quand la superficie du bassin diminue. Si le coefficient est nettement supérieur à 2, à partir de 3 par exemple, cette pratique devient dangereuse. De même, il convient de se méfier d'un coefficient trop faible, à moins de raisons physiques évidentes.

Dans le cas d'averses cycloniques, on peut utiliser les courbes enveloppes, un exposé de J. Francou au présent colloque permet de vérifier cette méthode avec plus de sûreté qu'autrefois.

S'il s'agit de crues polygéniques, il est intéressant de vérifier si la conjonction de crues provenant de diverses zones climatiques est possible et dans ce cas ne pas hésiter à additionner les crues maximales des divers affluents avec un amortissement raisonnable tenant compte des plaines d'inondation quand il y en a.

Dans les régions présentant à la fois fortes pentes, terrains ébouloux et pluies diluviennes, des barrages peuvent se créer naturellement et leur rupture peut donner lieu à des crues dont le débit est sans rapport avec la superficie du bassin versant. Seules les caractéristiques de la vallées entre la zone où ces phénomènes risquent de se produire et le site de l'ouvrage permettent de supputer la limite supérieure du débit de crue à escompter, limite qui, en tout état de cause, est généralement supérieure à plusieurs milliers de  $m^3/s$ .

Le cas des régions où les précipitations annuelles très irrégulières dépassent de peu, en saison des pluies, le déficit d'écoulement, est le plus délicat car une forte augmentation des précipitations se traduit par une augmentation beaucoup plus importante des débits, de sorte que les crues exceptionnelles correspondent à des valeurs maximales très supérieures à celles qu'on observe en fortes crues et l'extrapolation des données dont on dispose est inutile et dangereuse. Il faut avoir alors une idée des coefficients de ruissellement, de leur croissance avec la hauteur des précipitations mensuelles qui devient très rapide au-delà d'une certaine limite et prendre en considération des conditions maximales de précipitations.

### 3. CAS DES BASSINS VERSANTS DE SUPERFICIE MOYENNE

Dans le cas le plus courant, il s'agit de bassins dont la superficie est comprise entre 200 et 10 000  $km^2$ . C'est le cas le plus difficile car les données disponibles sont rares, les processus de la genèse des crues plus complexes que pour les petits bassins et les fréquences à considérer aussi faibles en général que pour les grands bassins. C'est le domaine d'application de la méthode des isochrones mais il est rare qu'on puisse disposer d'éléments suffisants pour l'appliquer. Nous ne saurions trop recommander de procéder, chaque fois que c'est possible, à des études simultanées des précipitations et des averses pendant deux ans afin d'avoir quelques éléments pour appliquer cette méthode.

Dans le cas de région à très fortes crues la méthode des courbes enveloppes peut rendre de grands services mais il importera de l'utiliser en toute connaissance de cause, après un examen approfondi du bassin (pente, perméabilité, traces d'érosion) et du réseau hydrographique afin de vérifier si, pour la région naturelle où est situé le bassin à étudier, les crues peuvent être considérées comme normales, fortes ou faibles, car dans le domaine des bassins versants de moyenne superficie la variabilité du régime d'un bassin à celui d'un autre peut être très grande.

En conclusion, c'est toujours lorsque l'on procède à de telles évaluations que l'on regrette que si peu d'études aient été faites sur le terrain. Les véritables remèdes sont les suivants :

- 1) Etudes régionales des conditions générales aérologiques donnant lieu à des averses exceptionnelles;
- 2) Etudes systématiques des précipitations de faible fréquence, de leur répartition spatiale, des courbes intensité-durée, y compris des recherches historiques sur les précipitations exceptionnelles;
- 3) Exploitation coordonnée des données de bassins versants représentatifs et expérimentaux existants de façon à déterminer les éléments de transformation des hauteurs

de précipitations en débits pour chaque région naturelle suivant la pente, la perméabilité, le régime des précipitations, la végétation, avec création éventuelle de nouveaux bassins représentatifs;

- 4) Amélioration des réseaux de stations de jaugeages avec mesure de débits pour les plus fortes crues possibles;
- 5) Chaque fois qu'il y a une série de crues exceptionnelles enquête, à posteriori sur les précipitations et les hauteurs d'eau comportant des opérations du genre de celles qu'au Canada on appelle «bucket survey» avec publication de notes spéciales sur ces crues exceptionnelles afin que vingt ans après il en reste encore des données objectives;
- 6) Examens critiques des données existantes sur les plus fortes crues et report sur les diagrammes des courbes enveloppes, comparaison avec les données de régions de même régime.

Ces différentes opérations nécessitent, pour la plupart, la collaboration de plusieurs pays et peuvent largement être facilitées par la Décennie Hydrologique Internationale.

### BIBLIOGRAPHIE

1. *Guide des Pratiques Hydrométéorologiques*, Organisation Météorologique Mondiale, W. M. O., n° 188, T. P. 82, Secrétariat de l'O. M. M. Genève, Suisse, 1965.
2. LINSLEY, R., KOHLER, M. A. and PAULHUS, J. (1958): "Hydrology for engineers" McGraw-Hill Book Co., New York.
3. RODIER, J. A. et AUVRAY, C. (1965): « Estimation des débits de Crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km<sup>2</sup> en Afrique Occidentale », Orstom, *Service Hydrologique*, Paris.

### DISCUSSION

Dr. M. M. ZHURAVLEV (USSR) :

1. Quelle est la probabilité de dépassement du débit maximal si on prend le débit décennal avec le coefficient 2?
2. Si c'est possible, résumez s'il vous plaît en quelques mots les motifs d'application du coefficient 2?
3. Avec quelles limitations est appliquée cette méthode simple aux évaluations hydrologiques dans votre pays?

Reply by Mr. J. RODIER :

Tout d'abord, que veut dire la crue maximale?

La crue maximale est celle qui est pratiquement très rare avec une fréquence inférieure à 1/1000 ou 1/10 000. C'est ainsi la crue que l'on obtient par la méthode des précipitations maximales probables exposées par M. Myers. C'est-à-dire que pour la crue maximale nous choisissons la hauteur de précipitations maximale probable que nous transformons ensuite en débit.

En nous basant sur cela nous évaluons le rapport  $k$  qui existe entre  $Q_{10}$  et  $Q_{\text{maximal}}$  ( $Q_{10}$  = crue décennale) :

$$K = \frac{Q_{\text{max}}}{Q_{10}}$$

Ce coefficient n'est valable que pour une région. Il arrive que pour la plus grande partie des régions tropicales que nous étudions « $k$ » est très souvent proche de 2.

Je répète que c'est un coefficient régional. Si on descend plus bas, vers les pays équatoriaux avec un climat humide «*k*» devient égal à 1,4-1,5.

Bien entendu, dans quelques zones nous pourrions avoir des valeurs plus faibles que 1,5.

Supposons que nous ayons une distribution normale, alors en coordonnées gaussiques la courbe de la distribution se présente comme une droite.

Pour une pente donnée nous avons un coefficient  $k = 2$ . Si la pente augmente  $k > 2$ .

Ainsi si la pente diminue, le coefficient est moins de 2. D'autre part, si nous avons une distribution normale nous devons utiliser le coefficient 2. Si elle est de type hypogaussique nous employons un coefficient inférieur à 2.

Du point de vue purement statistique, c'est un calcul approximatif mais c'est une méthode utile pour certains pays. Ce fait a une importance purement régionale. Dans la région on aura la possibilité de calculer ce coefficient «*k*» pour les cours d'eau bien connus et vérifier s'il est acceptable pour toute la surface de la région donnée à partir des conditions naturelles que nous connaissons bien. C'est-à-dire que la courbe de distribution sera environ la même.

Donc, on peut utiliser le coefficient «*k*» pour les fleuves moins bien connus de la région. Mais il est difficile d'évaluer ce rapport pour les régions arides par exemple où le calcul de la courbe de distribution des précipitations est impossible à faire : voilà une limitation.

La valeur de «2» est bonne pour le Haut Niger, Haut Sénégal ou pour les autres rivières de l'Afrique tropicale.

Si on descend plus bas vers les zones équatoriales qui sont très humides, ce coefficient sera dans les limites 1,4-1,5. Vers le désert au contraire *k* sera très supérieur à 2. Ce sera, certainement, un calcul approximatif mais c'est tout à fait acceptable pour les fleuves avec la distribution normale et hypogaussique.