

Journées d'études de l'eau  
Strasbourg - Mars 1972

Problèmes méthodologiques relatifs  
à la connaissance des crues

par

Marcel ROCHE

Ingénieur en Chef à Electricité de France  
Chef du département de la Recherche Fondamentale au Service Hydrologique de  
l'ORSTOM.

Vice-Président de la Commission Internationale des Eaux de Surface.  
Professeur à l'ENGREF.

## Résumé

C'est essentiellement un problème pratique qui concerne non seulement le chercheur mais surtout l'ingénieur chargé d'établir un projet. Les méthodes destinées à l'estimation des crues "de projet" sont très variées et peuvent conduire à des résultats parfois très différents. C'est que chacune a un champ d'utilisation limité qui dépend des conditions naturelles géographiques, topographiques et climatiques, mais aussi et surtout des données disponibles. L'auteur s'est efforcé de mettre en relief les aspects particuliers que peut revêtir la méthodologie et les différents problèmes qui leur sont liés. Il a cru bon d'insister, peut-être plus qu'il n'est de coutume, sur l'importance primordiale de la mesure des forts débits et sur celle des enquêtes destinées à éclaircir le mystère des crues passées.

### Abstract

This problem is essentially a practical one concerning not only the searcher but overall the designer of any project. There are many methods which aim at estimating design floods and their results may be quite different. The reason is that each of them has a restricted field of utilization depending from geographical, topographical and climatical natural conditions, but also and mainly from available data. The author did his utmost to throw into relief particular aspects of the methodology and various problems which are linked to it. He thought it was good to insist, perhaps more than usual, upon the very great importance of measuring big discharges and inquiring into past floods.

## 1. POSITION DU PROBLEME

Avant de chercher à résoudre les problèmes concernant les crues, il convient de définir d'une façon claire les éléments de ces crues pour lesquels on recherche des évaluations quantitatives. Dans sa définition géographique, le terme "crue" couvre en effet un ensemble composite de manifestations naturelles non quantifiable directement par une valeur scalaire.

On sait qu'une crue se présente, sous la forme la plus simple, comme une croissance du débit de la rivière en un point donné, l'obtention d'un maximum qu'on appelle généralement "pointe de crue", suivi d'une décroissance du débit qui porte le nom de décrue. La représentation graphique de ces variations de débit est appelée hydrogramme de crue. Bien entendu, la nature n'est nullement tenue de se plier à un schéma aussi simple, et un hydrogramme de crue peut comporter en fait plusieurs maximums séparés par des décrues partielles. On dit alors que la crue est complexe, sa complexité pouvant venir, soit de la répartition dans le temps des pluies qui lui ont donné naissance, soit de la géomorphologie du bassin qui peut entraîner des décalages dans la propagation à partir des principaux affluents.

Une crue peut donc être décrite comme une succession de débits pris à des intervalles de temps suffisamment petits pour qu'une telle description suive d'assez près la courbe continue qu'on peut enregistrer, par exemple à partir d'un limnigraphe. Il est possible, tout au moins théoriquement, de traiter une telle fonction en utilisant des processus aléatoires. En fait, malgré un arsenal mathématique extrêmement élaboré, nous ne connaissons aucune méthode développée à partir de ces processus qui, actuellement, soit vraiment satisfaisante. Nous considérons que ceci est encore du domaine de la Recherche et nous n'en parlerons pas dans le présent exposé.

On peut également définir sur un hydrogramme de crue un certain nombre d'éléments susceptibles de le caractériser de façon satisfaisante pour les besoins pratiques recherchés. Ces éléments sont essentiellement : le volume de la crue, son débit maximal, son temps de montée, c'est-à-dire le temps qui s'écoule entre le début du ruissellement et le maximum, son temps de base, c'est-à-dire la durée totale du ruissellement.

Les besoins en information concernant ces différents éléments dépendent essentiellement de la nature de l'aménagement pour laquelle est calculée la crue. Si celui-ci ne comporte aucun réservoir (fil de l'eau), ou un réservoir manifestement insignifiant vis-à-vis du volume de la crue, il suffira d'étudier les débits de pointe des crues.

Cela ne veut toutefois pas dire de façon absolue qu'on n'aura à aucun moment besoin d'envisager la crue dans son ensemble, notamment d'étudier sa forme. Il se peut en effet que la méthode utilisée requière une telle connaissance; mais il s'agit alors d'un moyen de calcul, et non pas d'une étape indispensable pour le but recherché. Si par contre l'aménagement comporte une réserve suffisamment importante pour que l'on estime pouvoir utiliser le laminage afin de réduire la capacité des organes évacuateurs, il est indispensable, outre le débit maximal, de se fixer la forme de la crue; il est même des cas où le volume de celle-ci a plus d'importance que son débit maximal.

-Un autre critère de choix, pour la méthode de l'étude des crues, est la taille du bassin versant. Elle intervient notamment lorsqu'on développe des procédés de transformation pluie-débit afin d'utiliser les données pluviométriques pour la détermination des éléments intéressants de la crue. C'est ainsi que, lors de l'utilisation de modèles de transformation, on pourra, dans le cas d'un petit bassin, utiliser des modèles globaux (hydrogrammes unitaires), alors que pour des grands bassins, on devra s'adresser à des modèles plus complexes, soit à caractère matriciel, soit comportant des fonctions de transport dans le réseau hydrographique.

D'un autre point de vue, on distinguera pour l'étude des crues les méthodes directes, c'est-à-dire basées uniquement sur l'utilisation des débits, et les méthodes indirectes mettant en jeu des données pluviométriques.

## 2. ACQUISITION DES DONNEES NECESSAIRES

Avant toute étude, il est une opération particulièrement importante : celle du rassemblement, de la critique et de la mise en oeuvre des données existantes. Il est possible dans certains cas qu'on soit amené, pour l'étude d'un projet, à demander des mesures complémentaires, soit en hydrométrie, soit en pluviométrie. Il est bien rare toutefois que l'on dispose du temps nécessaire pour constituer au moyen de ces mesures des échantillons susceptibles de fournir les données nécessaires avec une précision suffisante. De telles mesures sont plutôt utilisées pour faciliter l'interpolation ou la transposition géographique d'observations de longue durée préalablement existantes.

Les données nécessaires à l'étude portent sur les débits de hautes eaux qui ont été mesurés au site étudié ou à sa proximité, sur les crues passées dont il est possible par voie d'enquête de connaître quelques éléments, sur les données pluviométriques disponibles, sur les caractéristiques du bassin, y compris sa géologie et sa pédologie, qui sont parfois indispensable pour permettre des transpositions géographiques ou l'évaluation de certains paramètres concernant le ruissellement.

### 2.1 Mesures directes des débits

Ce sont les mesures de hauteurs et les jaugeages qui sont effectués, soit à la station ou aux stations du réseau auxquelles on se réfère pour donner des indications de longue durée, soit à la station installée spécialement pour l'étude de l'aménagement en vue de préciser les correspondances entre les débits au droit de cet aménagement et les débits aux stations de références. Les résultats de ces mesures sont évidemment primordiaux pour tous les calculs de débits qu'on peut faire ultérieurement. Elles doivent être généralement acquises, au moins en grande partie, au moment où démarre le projet d'aménagement et où l'on commence à se préoccuper de l'importance des crues à évacuer; il est possible évidemment d'effectuer de nouvelles campagnes de mesures, mais en ce qui concerne les hautes eaux on n'est jamais sûr d'obtenir pendant la période des études des débits suffisamment élevés pour que ces opérations soient d'un grand secours dans l'estimation des crues.

Il est en fait très rare que l'on dispose de mesures directes de très hautes eaux pour deux raisons : ces très hautes eaux sont relativement peu fréquentes, leur évolution est souvent rapide et pour peu que l'accès de la station soit malaisé, on a quelquefois du mal à les saisir; les mesures sont souvent difficiles et il est quelquefois impossible d'effectuer des jaugeages complets par une méthode d'exploration du champ des vitesses. Les difficultés qu'on peut rencontrer ne doivent toutefois en aucun cas être une excuse pour ne pas réaliser des mesures de grandes crues. Une station quelle qu'elle soit, et surtout si elle est située sur une rivière à crues rapides et difficilement saisissables, doit être équipée de manière à ce qu'il soit possible d'effectuer très rapidement des évaluations plus sommaires des débits à partir de mesures des vitesses de surface, par exemple au moyen de flotteurs. Un hydrologue opérant dans des régions où coulent de telles rivières doit être parfaitement au courant de ces techniques.

Actuellement, et à condition bien entendu que les moyens lui en soient donnés, il n'a aucune excuse pour ne pas réaliser des jaugeages d'une approximation suffisante lors des plus grandes crues. Bien entendu, cette méthodologie n'est pas toujours simple car s'il est relativement facile, notamment en s'aidant de flotteurs naturels, d'effectuer des mesures précises des vitesses de surface (mieux que 10 %), il est beaucoup plus difficile d'évaluer la section mouillée lors de la crue. En effet, les rivières de ce type sont souvent très affouillables compte tenu des vitesses énormes qui peuvent se manifester (de 5 à 10 m/s et même plus durant les crues). Les choses sont parfois facilitées lorsque la rivière contient, enfouis sous le sable, des seuils stables. On sait alors que la section maximale lors de la crue n'a pu être supérieure à celle qui correspond au profil du seuil; ces seuils peuvent être repérés et mesurés au moyen de sondages géophysiques : sondages électriques ou micro-sismique. On a tenté récemment avec succès des mesures directes du fond pendant la crue elle-même, au moyen de sondages dynamiques.

Fort heureusement, toutes les stations ne posent pas des problèmes de mesure aussi délicats. De nombreux fleuves et rivières peuvent être jaugés de façon régulière, c'est-à-dire par exploration complète du champ de vitesse ou par jaugeages chimiques, jusque dans les plus hautes eaux. Il est évident que dans ces cas l'information n'en sera que meilleure.

#### 222 CALCUL DES DEBITS, ENQUETE SUR LES PLUS HAUTES EAUX

Dans la pratique des projets, on rencontre néanmoins de nombreux cas où l'exploitation du réseau est bien loin d'avoir été menée de la façon correcte que nous avons indiquée ci-dessus. D'autre part, même dans le cas où il y a tout lieu d'être satisfait à ce sujet, il peut toujours se faire que les jaugeages des plus hautes eaux n'aient pas pu être réalisés; des crues dont on connaît l'existence ont pu également se produire avant la mise en route de la station. On peut donc se trouver en face du double problème de rechercher les hauteurs auxquelles ont pu arriver des crues connues ou inconnues, mais en tout cas non mesurées, et d'estimer par le calcul les débits correspondants à ces hauteurs.

L'évaluation du débit correspondant à une hauteur de crue donnée, en dehors de la mesure directe de ce débit, relève de l'utilisation des formules d'écoulement. On utilise le plus couramment les formules d'écoulement à surface libre dans les canaux et les biefs rectilignes des rivières, la plus employée de ces formules étant celle de Manning-Strickler :

$$U = K R^{2/3} S^{1/2}$$

dans laquelle U désigne la vitesse moyenne dans la section, R le rayon hydraulique qui peut être assimilé à la profondeur moyenne dans le cas d'une rivière, S la pente du bief. K est appelé coefficient de Strickler; il est dimensionnel et sa valeur dépend donc des unités employées. A titre indicatif, si l'on exprime U et R en unités métriques (m/s par seconde et m), K peut varier de 10 pour les rivières encombrées de blocs ou d'une importante végétation, à 40 pour des lits extrêmement lisses. Pour les oueds sahariens dont les fonds sont sableux ou recouverts de graviers ou de petits galets, K est de l'ordre de 35. De nombreux auteurs préfèrent utiliser le coefficient n de Manning qui est l'inverse du coefficient de Strickler.

Il est important de savoir que le coefficient de Strickler croît en fait jusqu'à un palier avec le rayon hydraulique, bien qu'il soit sensé caractériser la rugosité du lit. Les estimations que l'on fait avec les valeurs couramment admises supposent donc que l'on ait un tirant d'eau relativement fort; pour les oueds sahariens par exemple, ayant une pente de l'ordre de quelques ‰, le palier est atteint pour une profondeur de 1m,50 à 2m,50 .

Dans certains cas, on peut utiliser également des circonstances hydrauliques particulières permettant d'obtenir à partir des formules de meilleures estimations ou tout au moins de contrôler des évaluations faites par d'autres moyens. Ce sera par exemple le remous causé par un pont, lorsque celui-ci est particulièrement important, ou bien l'utilisation d'un déversoir naturel, ou bien celle de l'évacuateur de crue d'un barrage, etc. De toutes façons, on aura d'autant plus de chance de serrer la réalité que l'on multipliera les précédés indépendants d'estimations.

Les calculs précédents peuvent s'appliquer à des estimations de débits pour des crues dont on connaît, pour les avoir observés ou enregistrés, les hauteurs et les lignes d'eau. Lorsque l'on ne dispose pas de ces deux éléments, il convient de mener toutes les enquêtes permettant de les dégager.



La méthodologie de l'enquête hydrologique spécialement axée sur le problème des grandes crues est assez variée. Elle dépend à la fois des possibilités locales d'information et du type de crue sur laquelle portent les investigations. Il est évident à ce point de vue qu'on a intérêt à remonter le plus loin possible dans le temps, puisque le problème d'évacuation des crues pour un aménagement est un problème d'extrême qui ne saurait se satisfaire de la connaissance des valeurs plus ou moins centrales de la distribution statistique d'un échantillon. Sans vouloir donner un caractère rigide à ce genre de recherche, disons qu'on pourra distinguer :

- les crues historiques récentes
- les crues historiques anciennes
- les crues historiques antiques
- les crues préhistoriques ou géologiques.

Dans notre esprit, ces désignations se rapportent plutôt à l'état de l'information au moment où la crue s'est produite qu'à une chronologie fixe et indépendante des pays étudiés. On parlera de crues historiques récentes lorsqu'il est possible de trouver des témoins oculaires ou une littérature très précise les concernant, notamment des articles de presse, ou des documents photographiques, etc. Si ces crues sont vraiment très récentes, généralement moins de 10 ans, il peut être possible de retrouver des délaissés de crue organiques (bois, paille, etc.) permettant de reconstituer même les lignes d'eau. La période relative à ce genre de crue ne saurait excéder une centaine d'années dans les cas les plus favorables.

Les crues historiques anciennes sont celles pour lesquelles on ne peut disposer que de documents relativement vagues, et dont les traces ne peuvent que rarement être datées de façon précise. Elles sont surtout connues par les dégâts qu'elles ont occasionnés (destructions de villages ou de ponts, inondations spectaculaires dans les villes). On peut parfois disposer, pour ces crues, de marques apposées par les autorités ou par des particuliers sur des murs ou sur les monuments. Il est rare qu'on puisse reconstituer des lignes d'eau de façon satisfaisante.

Les crues antiques sont celles dont il est question dans les documents de l'antiquité des différents pays; elles peuvent très exceptionnellement avoir fait l'objet de mesures dont on retrouve des traces (crues du Nil), mais l'information à leur sujet est beaucoup plus souvent uniquement qualitative. Pour les crues que nous appellerons géologiques, on ne dispose plus que d'indices provenant des modifications qu'elles peuvent avoir occasionnées à la géomorphologie de la rivière; elles ne peuvent fournir aucune donnée quantitative.

En fait, la plupart des enquêtes ne peuvent porter que sur les crues historiques récentes ou tout au moins pas trop anciennes. Exceptionnellement, on peut retrouver des traces très nettes de vieilles crues qu'il est du reste généralement impossible de dater. Il est difficile dans ce bref exposé d'esquisser même sommairement les innombrables cas qui peuvent se présenter et les méthodes qui leur correspondent. Disons seulement que, des crues répétées, et même parfois une seule crue, peuvent provoquer sur les roches des modifications permanentes qui se traduisent, dans les meilleurs cas, par la visualisation de la ligne d'eau atteinte. On peut, lorsque le cas se présente, tirer des conclusions parfois importantes de l'existence de dépôts, blocs surtout, laissés par les eaux à des hauteurs élevées, en vérifiant que la composition minéralogique de ces dépôts ne correspond pas à celle des falaises ou autres terrains situés à proximité du lit et d'où ils pourraient être originaires par un simple phénomène d'érosion locale.

Nous avons parlé de la nécessité de connaître la ligne d'eau pour l'application des formules d'écoulement en rivière. En fait il n'est pas toujours possible de l'obtenir même pour les crues relativement récentes, y compris celles dont les hauteurs sont connues. Il convient alors de mesurer la pente du fond de la rivière ou d'une ligne de basses ou moyennes eaux; on doit alors tenir compte du fait que la pente du fond ou la pente d'une ligne de basses eaux peut être très différente de celle d'une ligne de hautes eaux. On sait que cette pente a tendance à se régulariser en hautes eaux, les accidents locaux étant progressivement noyés à mesure que la crue devient plus forte; il convient donc d'effectuer les nivellements correspondants sur la plus grande longueur possible en tâchant toutefois de rester dans un bief à peu près rectiligne.

Les calculs de débits doivent être faits à partir d'une section moyenne tirée de différents profils répartis le long du bief.

Nous évoquerons implemment le problème de l'extrapolation des courbes d'étalonnage qui peut dans certains cas être plus précis que le calcul hydraulique, notamment lorsque cette extrapolation n'est pas trop importante et lorsque la section est à peu près régulière. Il faudra toujours procéder par vitesse et sections (par exemple : méthode de Stevens).

### 2.3 Données pluviométriques

Les données pluviométriques relatives à l'étude des crues sont toujours au moins des données pluviométriques journalières. Si le bassin est de taille modéré, mettons moins de 4 à 5 000 km<sup>2</sup>, il est souvent indispensable d'utiliser un pas de temps inférieur à la journée, par exemple le pas de temps horaire. Il est rare que l'on dispose d'un grand nombre de relevés pluviographiques permettant une décomposition des pluies journalières en tous les points où la pluie est mesurée sur le bassin. On convient alors que les relevés pluviographiques disponibles sont représentatifs de la répartition de la pluie dans le temps aux pluviomètres qui peuvent leur être rattachés. C'est souvent faux, mais de toutes façons on a aucun autre moyen de procéder.

Toute utilisation sérieuse des données pluviométriques doit être précédée d'une étude critique très poussée des résultats disponibles. Pour cela, il convient en premier lieu de s'assurer que les résultats dont on dispose sont bien conformes aux originaux des observateurs, c'est-à-dire que l'on n'a pas ajouté aux erreurs initiales de ces derniers des erreurs de transcription. Cette vérification est importante : l'expérience montre que pratiquement toutes les publications, et même les copies directes, comportent de telles erreurs parfois si importantes que le reste de l'étude critique perd toute signification. On doit ensuite procéder à une vérification générale des erreurs systématiques par la méthode des doubles masses. D'autres opérations de caractère qualitatif sont également effectuées. L'ensemble de ces opérations conduit à l'élaboration d'un fichier pluviométrique corrigé qui peut alors être utilisé avec le minimum de risques.

### 2.4 Caractéristiques du bassin

L'étude des caractéristiques géomorphologiques du bassin est surtout destinée à contrôler la vraisemblance des valeurs admises pour les paramètres du ruissellement, lorsqu'il y a lieu d'effectuer une étude hydropluviométrique.

Certaines de ces caractéristiques peuvent être déterminées à partir de la carte topographique : celle qui sont relatives au relief (notamment l'indice de pente), à la superficie, à la forme du bassin et aux conditions de drainage (densité du réseau hydrographique). D'autres caractéristiques doivent faire l'objet d'une prospection sommaire du bassin. Cette prospection portera essentiellement sur les conditions de la rétention de surface dont il est souvent difficile de se rendre compte à partir de la carte topographique, et sur les possibilités d'absorption du sol, compte tenu de la pédologie, de la géologie et de la végétation.

Les possibilités de rétention de surface dépendent de la densité des petites dépressions et de tout empêchement qui peut être opposé au ruissellement. Les cartes géologiques, si détaillées soient-elles et même si elles indiquent clairement les faciès, ce qui n'est pas toujours le cas, ne sauraient donner des renseignements sur l'état des surfaces de roches exposées aux précipitations, état qui presque seul conditionne à la fois les possibilités de rétention et les capacités d'infiltration. Par exemple, un calcaire fissuré est à priori un bon absorbant d'eaux pluviales, mais s'il est en couche peu puissante et s'il repose par exemple sur une couche de marne, l'absorption peut au plus donner lieu à de la rétention de surface; s'il existe d'autre part un pendage même modéré (un peu plus que sub-horizontale), l'écoulement redevient libre et il n'y a plus, vis-à-vis du ruissellement, ni infiltration, ni rétention de surface.

## 2.5 Etude des conditions météorologiques générales.

L'utilisation des données pluviométriques dont il a été parlé plus haut permet de résoudre le problème de la distribution des pluies ponctuelles dans le temps et celui de la distribution des pluies dans l'espace. Cependant, pour certaines applications il est bon de pouvoir préciser cette notion de distribution dans l'espace par l'analyse des facteurs qui la conditionnent; ceci est lié à la question de la genèse des averses et plus généralement des épisodes pluvieux. Pour une application de la méthode des précipitations maximales probables par exemple, il n'est pas indifférent de savoir si une telle précipitation doit être considérée comme étant d'origine cyclonique ou orographique, ou comme le produit de cellules convectives. Dans le premier cas, la pluie moyenne sur le bassin d'une certaine étendue sera beaucoup plus importante, par rapport à la précipitation ponctuelle déterminée, que dans le second cas; on doit donc s'attendre à une crue plus importante dans le premier cas que dans le second.

Si les crues du bassin mettent en jeu des problèmes de neige, des données plus détaillées devront être rassemblées sur les températures, la nature des précipitations et l'évaluation périodique (ou surveillance) du stock de neige.

### 3. EVALUATION DIRECTES DES CRUES DE PROJET

On classera dans cette rubrique les études de crues faites à partir des seuls débits ou hydrogrammes connus.

#### 3.1 Constitution d'un échantillon de crue

Il faut d'abord définir l'élément de crue dont on doit constituer un échantillon. Il peut s'agir de la pointe de la crue ou du volume ruisselé pendant une crue : ce sont les caractéristiques dont on a généralement besoin au cours de l'étude d'un projet. Lorsqu'il s'agit d'un aménagement au fil de l'eau, il suffit d'opérer sur un échantillon de pointes de crue, c'est-à-dire de débits maximaux instantanés observés durant les crues. On peut décider que la variable aléatoire à étudier sera le plus fort débit annuel; on constituera ainsi un échantillon composé d'autant de valeurs qu'il y a d'années d'observation. Du point de vue statistique, cette définition est parfaitement rigoureuse et ne peut entraîner aucune contestation. Du point de vue pratique, elle présente l'inconvénient de n'utiliser qu'une faible partie de l'information dont on dispose pour les débits. C'est pourquoi certains d'hydrologues ont cherché à améliorer cette utilisation de l'information en considérant plusieurs crues dans l'année, ou plus exactement en sélectionnant les crues suivant d'autres critères, tel que le dépassement d'un débit donné. C'est une méthodologie d'échantillonnage incomplet qui, du point de vue statistique, complique beaucoup les choses puisqu'elle doit introduire non seulement l'analyse des débits eux-mêmes, mais celle des durées séparant les pointes de crues. Pour résoudre de tels problèmes, on est inévitablement amené à mettre en jeu la technique des processus aléatoires avec des définitions de base souvent très contestables; entre autres, une des influences parasites les plus difficiles à écarter, et qui, à notre avis ne l'a encore jamais été de façon satisfaisante, est celle de la variation saisonnière.

Les problèmes qui se posent pour la constitution des échantillons de pointes de crue se posent à peu près de la même manière pour un échantillon de volumes de crue. Simplement, pour ces derniers la définition de la variate est plus consistante.

### 3.2 Analyse statistique de l'échantillon

Laissons de côté dans notre exposé le point de vue des processus stochastiques qui nous semble pour l'instant encore beaucoup trop contestable. Nous supposons que le résultat de l'opération précédente est la constitution d'un échantillon de variates indépendantes à raison d'une valeur par année. Il doit être possible dans ces conditions de poser que la distribution de la variate adoptée obéit à une loi statistique dont l'échantillon constitué peut permettre d'évaluer les paramètres. Cette hypothèse ne peut cependant pas être considérée comme formellement établie; on peut penser, au moins dans certains cas, que les différentes crues observées sur un bassin puissent être tirées de populations différentes. Même dans ce cas, il ne semble pas toutefois que l'on puisse commettre de grosses erreurs pratiques en considérant la loi de distribution calculée non pas comme une véritable loi statistique, mais comme une représentation analytique empirique de la distribution observée.

Le vrai problème est de savoir si on a le droit d'extrapoler une telle loi de distribution; ceci pose le problème de l'adéquation du modèle statistique. Or on n'a aucun moyen, pour ce genre de phénomène, de construire des modèles a priori; on ne peut donc qu'essayer un certain nombre de formes de distribution et prendre comme la meilleure celle qui répond le mieux à un critère de choix qu'on se sera défini. L'ennui, c'est que ce critère de choix ne peut être calculé qu'à partir des données existantes qui, du fait de la brièveté des observations par rapport aux extrapolations qu'on s'appête à faire, ne peuvent que concerner des valeurs relativement centrales. Il y a donc toujours un doute à ce sujet, mais il y a plus. En admettant que les lois retenues soient parfaitement adéquates, il reste à apprécier la dispersion aléatoire d'estimation des quantiles due aux erreurs de l'échantillonnage. Cette dispersion est d'autant plus importante que l'échantillon est plus petit, que la variance de la variate étudiée est plus grande, que la forme de la distribution est plus dissymétrique, que le quantile dont on cherche la valeur est de fréquence plus rare.

Or, en matière de crue, et surtout s'il s'agit de l'étude des pointes de crue, on recherche les valeurs les plus extrêmes, on a affaire à des lois passablement dissymétriques et ce d'autant plus que le bassin est plus petit et que la région est plus aride. Il faut donc s'attendre, tout au moins pour certains bassins, à voir des intervalles de confiance extrêmement larges dans l'estimation statistique des forts débits de crues. En définitive, on ne peut guère retirer de résultats utiles de la seule méthode statistique que s'il s'agit de régimes à peu près réguliers, de faible variance et ayant une distribution pas trop éloignée de la normale. C'est le cas par exemple des grands fleuves tropicaux lorsque les périodes d'observations sont assez longues, disons au grand minimum 30 ans, mais plutôt 40 ou 50 ans.

Dans les autres cas, il n'est jamais mauvais de faire des ajustements statistiques sur les échantillons dont on dispose, mais sans perdre de vue les marges d'estimation auxquelles cette opération conduit pour les valeurs extrêmes, ce qui interdit pratiquement tout calcul direct et définitif par cette méthode. Une vieille expérience des projeteurs d'avant-guerre les conduisait à prendre pour débit de crue de projet le double du débit maximal observé, à condition que la période d'observations porte au moins sur une trentaine d'années; pour des périodes de durée inférieure, on adoptait certains coefficients de sécurité par rapport aux chiffres trouvés. Il faut bien reconnaître qu'on n'a jamais commis de graves erreurs en appliquant cette règle très simple, à condition de ne pas l'utiliser pour des bassins trop petits.

### 3.3 Transposition géographique et inventaire mondial des crues.

Les analyses statistiques peuvent être singulièrement valorisées lorsqu'on compare entre eux les résultats obtenus sur des bassins ayant des caractéristiques géomorphologiques et climatologiques analogues, surtout si ces bassins sont assez éloignés les uns des autres pour qu'on puisse considérer leurs crues comme indépendantes, on peut alors, tout au moins en principe, appliquer des méthodes analogues à celle dite des stations-années pour la pluviométrie. La portée de cette opération reste pourtant extrêmement limitée par les difficultés de trouver effectivement des bassins analogues de ces deux points de vue. Un pas supplémentaire est fait dans cette voie par l'analyse factorielle des crues qui prend en compte l'influence des différents éléments de la géomorphologie et de la climatologie sur la valeur de la crue. Cette méthode est actuellement particulièrement développée par l'école anglaise.

Des méthodes qui peuvent être considérées comme dérivées de ces méthodes de transpositions sont celles qui mettent en jeu l'inventaire des crues mondiales. Cet inventaire consiste à dresser, pour le maximum possible de stations réparties dans le monde entier, la liste des débits maximaux observés ou calculés. Ces débits sont portés sur un graphique en regard de la superficie du bassin. Si l'on considère sur un tel graphique l'ensemble des ordonnées (débits) correspondant à une abscisse fixe (superficie), la distribution des débits le long de la droite des ordonnées dépend à la fois de la morphologie des bassins, de leurs conditions climatiques et de la longueur de la période d'observation (en moyenne bien entendu). Le couple caractéristique morphologique-caractéristique climatologique forme, pour une superficie donnée, un ensemble répondant à une caractéristique géographique ou régionale. Cet ensemble peut éventuellement être représenté par un indice ou par un coefficient. Le nombre d'années de la période d'observation est arbitraire par rapport à la définition, par exemple, d'une crue de projet recherchée. C'est le grand reproche qu'on a fait à ce genre de méthode : les crues portées sur les graphiques ne sont pas définies en fréquence.

On peut toutefois faire remarquer que, si cette allégation est vraie, par contre l'enveloppe supérieure de tous les points correspondant à une caractéristique géographique donnée (géomorphologie + climatologie) constitue une estimation des crues de fréquence rare; on retombe sur un concept analogue à celui des stations-années. L'attitude qui consiste à mépriser un résultat parce qu'il n'est pas lié à une fréquence donnée n'est pas sérieuse si l'on considère l'imprécision de l'analyse statistique, telle que nous l'avons exposée plus haut, en ce qui concerne les valeurs des crues extrêmes.

Le premier répertoire connu des crues mondiales avec son interprétation graphique de courbes enveloppes, a été publié dans l'ouvrage de Creager "Engineering for dams". Le catalogue des crues a été complété par les travaux du célèbre potamologue français, le Professeur PARDE. On doit également à Pardé et à son école une interprétation de la variation des débits des crues en fonction de la superficie du bassin. La dernière remise à jour a été faite par Messieurs FRANCOU et RODIER qui ont par la même occasion élaboré une présentation originale des résultats. Dans leur diagramme, les superficies des bassins (en abscisses) et les débits absolus des crues (en ordonnées) sont portés en échelles logarithmiques.



Il se trouve qu'avec une telle représentation les courbes enveloppes correspondant à une caractéristique géographique donnée sont des débits d'équation :

$$Q/Q_0 = \left( \frac{S}{S_0} \right)^{1 - \frac{K}{10}}$$

où  $Q$  est le débit de crue en  $m^3/s$ ,  $S$  la superficie du bassin en  $km^2$ .  $Q_0 = 10^6 m^3/s$  et  $S_0 = 10^8 km^2$ .  $K$  est le coefficient géographique.

L'inconvénient de toutes les tentatives effectuées jusqu'à présent est qu'elles portent sur des données de valeur souvent inégale et sur un choix de bassins très hétérogène. L'enquête devra être reprise à l'échelle mondiale suivant des normes assez strictes : c'est une des actions que s'est fixées la Commission Internationale des Eaux de Surface pour l'exercice en cours. Il est probable que les résultats rassemblés seront interprétés selon le diagramme de RODIER-FRANCOU qui paraît actuellement le plus adéquat et le mieux élaboré.

#### 4. L'EVALUATION INDIRECTE DES CRUES

Rappelons que nous entendons par là l'évaluation des crues basée sur la connaissance des pluies, que l'on dispose ou non de données hydrologiques au site étudié. Si l'on ne dispose d'aucune donnée hydrologique, les estimations seront alors extrêmement incertaines puisque la réaction du bassin aux averses devra être entièrement imaginée à partir de ce que l'on connaît des caractéristiques géomorphologiques du bassin. Nous nous bornerons à signaler ce fait, sans nous étendre sur les méthodes qui doivent alors être mises en oeuvre il s'agit là d'un chapitre tout à fait particulier de l'hydrologie appliquée, traitant des évaluations hydrologiques en l'absence de donnée.

Dans le cas où l'on dispose de données pluviométriques pendant une période comme d'une certaine longueur, on peut déterminer avec plus de précision les relations entre les précipitations et l'écoulement, ces relations étant une caractéristique du bassin sans toutefois être indépendantes des précipitations, de leur quantité aussi bien que de leur répartition dans le temps et dans l'espace.

L'application, à la recherche des crues extrêmes, des relations précipitations-écoulements se fera donc en 3 temps :

- Détermination de la forme de cette relation en se basant sur les observations communes des pluies et des débits. Cette étude sera d'autant plus efficace que les données disponibles se rapporteront à des crues plus importantes tant du point de vue volume que du point de vue débit maximal. On appellera cette relation : opérateur T.

- Recherche d'une précipitation considérée comme extrême pour le bassin du point de vue de ses conséquences sur le débit de crue, on l'appellera pluie de projet : P P.

- Transformation de P P par T pour déterminer la crue de projet.

Cette présentation est très schématique et nous donnerons quelques précisions dans ce qui suit. En ce qui concerne les méthodes utilisées pour établir un opérateur T, les avis sont très partagés et ont donné naissance à des conceptions très différentes qui, à notre avis, devraient plutôt se compléter que se concurrencer. Un premier ensemble de méthodes consiste à établir directement des régressions entre l'élément intéressant de la crue (débit de pointe, volume, etc.) et les pluies correspondantes ainsi qu'éventuellement d'autres éléments climatiques. C'est ce que nous appellerons les modèles à régressions. D'autres préfèrent pousser davantage l'analyse de la transformation pour aboutir à des modèles plus physiques appelés parfois déterministes ou conceptuels, qui n'en comportent pas moins une part d'appréciation statistique des éléments.

Nous examinerons successivement ces deux conceptions puis nous donnerons un aperçu sur la détermination de ce qu'il est convenu d'appeler la pluie de projet.

#### 4.1 Les méthodes de régressions

Les procédés ne diffèrent en rien de ceux de l'analyse multi-variée des statisticiens. La variable dépendante ayant été sélectionnée, en l'occurrence le débit maximal pendant la durée d'une crue, est mise en régression avec un ou plusieurs éléments concernant essentiellement les précipitations et les températures. Ces éléments ne sont pas toutefois choisis au hasard; il faut d'abord et principalement qu'ils aient une influence reconnue et d'une certaine importance sur la valeur de la variable dépendante. On dispose en outre d'une série de procédés de calcul pour ne choisir que des variables ayant une influence véritablement significative.

En particulier, certains des variables employées peuvent voir entre elles les liaisons serrées qui enlèvent tout intérêt à les introduire ensemble. Les procédés des plus connus de sélection par le calcul sont la méthode des composantes principales et celle de l'étude systématique des corrélations partielles à plusieurs variables.

Le problème des régressions multiples ne se traite aisément que si toutes les régressions partielles ou totales sont linéaires, ce qui implique, en simplifiant beaucoup, que chacune des variables étudiées à une distribution normale et que chaque régression partielle à deux variables est homoscedastique, c'est-à-dire que la loi de distribution conditionnelle de la variance choisie comme dépendante ne dépend pas de la valeur de la variable choisie comme indépendante. Si ces conditions ne sont pas réalisées, il convient de faire les changements de variables ou les anamorphoses permettant d'obtenir des variables de travail répondant à ces conditions. On peut effectuer ces transformations par tâtonnement, par exemple essayer ce que donnent les logarithmes ou les racines carrées des variables, jusqu'à ce que l'on constate que les relations sont bien linéaires et, dans la mesure où l'échantillon disponible permet d'en juger, homoscedastiques. On peut aussi étudier séparément les distributions de toutes les variables et s'assurer par des anamorphoses qu'au moins les distributions marginales de la régression multiple sont normales.

Dans l'introduction très schématique que nous avons faite au début de cette partie de notre exposé, nous avons indiqué que l'opérateur T était une caractéristique du bassin, sous-entendant que cette caractéristique devait être constante dans le temps et par conséquent indépendante de l'évolution des éléments climatiques. En fait cela n'est pas tout à fait exact, puisque le ruissellement notamment peut être très fortement influencé par l'état d'humectation des terrains qui dépend essentiellement des précipitations antérieures à l'averse considérée. Cette influence peut être prise en compte dans les modèles à régressions par l'introduction, soit d'indices de précipitations antécédentes s'il s'agit d'un modèle stationnaire, soit d'un effet de rémanence s'il s'agit d'un modèle évolutif présentant quelque analogie avec les processus stochastiques. Un danger des modèles à régressions réside dans le fait qu'une relation de régression exprime une moyenne conditionnelle autour de laquelle les points réels sont dispersés de façon aléatoire. Il s'ensuit que l'application brutale d'une telle relation conduit pour la variable dépendante à une estimation des crues exceptionnelles évaluées par un tel procédé. Il serait souhaitable de disposer de moyens pratiques pour éviter cet écueil dans l'emploi des régressions, malheureusement les tentatives qui ont été faites jusque-là ne sont pas très encourageantes.

#### 4.2 Les modèles déterministes

Ces modèles se réfèrent au mode de fonctionnement d'un bassin versant, c'est-à-dire à la série des opérations successives qui ont lieu entre le moment où la précipitation arrive à la surface du sol et celui où l'eau récupérée dans le réseau hydrographique passe par l'exutoire. Comme pour les modèles de régressions, leur champ d'action n'est pas limité à l'étude des crues; ils sont très utilement employés pour les basses eaux ou pour n'importe quel type d'hydrogramme .

Du point de vue de leur conception, on peut distinguer entre les modèles qui considèrent le ruissellement comme le facteur essentiel de l'hydrogramme et ceux qui donnent une grande importance au jeu des réserves souterraines. Dans le premier cas, on peut imaginer de former directement l'eau disponible pour le ruissellement à partir des précipitations nettes et en tenant compte de façon assez schématique de l'infiltration, puis traiter les volumes d'eau ainsi dégagés par les équations générales de ruissellement, qui peuvent du reste inclure la fonction infiltration au moyen soit d'un coefficient de ruissellement, soit d'une capacité d'infiltration. Dans le second cas, il est nécessaire de constituer des séries de réservoirs dont les lois de remplissage et de vidange modulent la répartition de l'eau dans l'espace et dans le temps; des séries de fonctions et des seuils permettent également de tenir compte des pertes par évaporation qui peuvent se produire à partir des différents réservoirs. Nous appellerons modèles de ruissellement ceux qui sont dérivés de la première conception, et modèles à réservoirs ceux qui procèdent de la seconde.

D'un tout autre point de vue, la construction du modèle se ressentira de la distribution dans l'espace de la réaction du bassin. Ainsi, si l'on peut admettre que le bassin réagit globalement à une sollicitation de l'averse, on aura affaire toutes choses égales d'ailleurs, à un schéma relativement simple. Le plus connu des modèles correspondants, que l'on appellera modèles globaux, est celui de l'hydrogramme unitaire dont l'hypothèse essentielle est que, pour l'averse à laquelle on l'applique, le ruissellement se produit partout à la fois sur le bassin ou, s'il ne se produit pas en quelque partie de ce dernier, ne doit jamais s'y produire quelles que soient l'intensité et la hauteur de l'averse. La propriété essentielle d'un modèle de ce type est que, une fois le volume de ruissellement formé pour un intervalle de temps donné, la transformation que subi ce volume jusqu'à l'exutoire est totalement indépendante de ce qui peut se produire pour les intervalles de temps adjacents.

Cette propriété a pour conséquence directe que les différents hydrogrammes dérivés d'une averse découpée en tranches de temps peuvent s'additionner (en ordonnées bien entendu), pour fournir l'hydrogramme de ruissellement total résultant de l'averse à l'exutoire du bassin.

Si, au contraire, on ne peut pas admettre l'hypothèse d'une réaction globale, on doit découper le bassin en un certain nombre de surfaces plus restreintes pour laquelle l'hypothèse est réalisée, puis assurer le transport à l'exutoire des hydrogrammes élémentaires formés sur ces surfaces. Ceci peut se faire par l'introduction de modèles de transport dans le réseau hydrographique, ce qui est assez compliqué, ou par la considération d'un ruissellement généralisé sur le bassin conduisant à ce que nous avons appelé des modèles matriciels : le découpage du bassin est assuré par l'intersection d'un réseau de courbes isochrones avec les lignes de séparation des surfaces d'influence des pluviomètres disponibles, généralement déterminées par la méthode de Thiessen. Ce découpage en surfaces élémentaires se traduit numériquement par une matrice graduée, d'un côté, en temps d'isochronisme, et de l'autre, en numéros affectés aux différents pluviomètres; nous l'avons appelée "matrice caractéristique du bassin".

Le choix entre modèle global et modèle non global est très fortement influencé par la taille du bassin versant; il est bien évident que plus le bassin est petit, plus il aura de chance de réagir globalement aux averses. Au contraire un grand bassin verra ses réactions diversifiées non seulement à cause de son hétérogénéité plus grande, des temps de parcours qui s'allongent, mais aussi de la quasi-impossibilité pour les averses d'avoir des distributions géographiques analogues. Il faut toutefois signaler que la taille du bassin n'est pas la seule caractéristique en cause, de sorte qu'on peut dire schématiquement qu'il existe une gamme de superficies, disons supérieures à 5 000 km<sup>2</sup>, pour fixer des idées, pour laquelle on devra toujours faire appel à des modèles non globaux et une gamme de superficies, disons moins de 50 km<sup>2</sup>, pour laquelle on aura pratiquement toujours la possibilité de recourir à un modèle global et, enfin, une gamme de superficies comprises entre 50 et 5 000 km<sup>2</sup> pour laquelle on devra tantôt faire appel à des modèles globaux, tantôt à des modèles non globaux suivant la géomorphologie du bassin et la configuration spéciale des averses ou épisodes pluviaux susceptibles d'entraîner des crues importantes.

Tous ces modèles comportent un certain nombre de paramètres dont les uns sont susceptibles de représenter des éléments physiques du bassin versant (capacité de réservoir, seuil, etc.) et les autres régissent des lois de passage, des lois de perte, etc. Il est assez rare que l'on puisse fixer à priori les valeurs de ces paramètres. Il est donc nécessaire de régler les modèles, c'est-à-dire de rechercher les valeurs à donner aux paramètres pour reproduire le mieux possible les crues observées. Ce réglage peut se faire au moyen de programmes d'optimisation, mais le procédé est souvent très onéreux par suite du grand nombre d'opérations de transformation qu'il entraîne, et ne donne pas toujours les résultats escomptés. On préfère, la plupart du temps, effectuer des réglages dits "à la main" qui comportent chaque fois que l'on fait varier un ou plusieurs paramètres, un examen des résultats obtenus.

Un modèle conceptuel correctement réglé peut permettre, soit d'étendre les résultats hydrologiques connus au moyen de la pluviométrie, en transformant en débits les épisodes pluvieux les plus intéressants de la série disponible des données pluviométriques et pluviographiques. Il peut également servir à transformer un épisode pluvieux ou une averse jugée exceptionnelle et déboucher ainsi directement sur un hydrogramme de crue de projet.

#### 4.3 Détermination de la pluie de projet

Un modèle de transformation ayant été constitué, nous avons vu qu'on peut l'utiliser pour transformer des épisodes pluvieux existants, mais aussi des épisodes pluvieux imaginaires que l'on aura pu constituer par différentes méthodes et que l'on considère à tort ou à raison comme représentant un événement tout à fait exceptionnel sur le bassin. En effet, il ne faut pas perdre de vue qu'en fait le résultat final de l'opération doit être tel que la crue obtenue ne puisse pas raisonnablement se produire un jour au droit de l'aménagement projeté. Presque toutes les méthodes employées pour déterminer les pluies de projet sont basées sur la recherche de maximums ponctuels exceptionnels que l'on étend ensuite à la surface du bassin par des procédés qui, il faut bien le dire, font penser davantage à l'art culinaire qu'à la rigueur scientifique. On sait que la solution théorique du problème n'est pas simple et que, d'autre part, même si le problème pouvait être considéré comme résolu théoriquement, les données d'observation dont on dispose ne permettent généralement pas une application numérique rigoureuse.

Dans ces conditions, on est tout à fait fondé à utiliser sans arrière-pensée les procédés existants, et même à en créer d'autres pour les besoins de la cause si l'on juge que, pour des circonstances particulières, cela rendra l'estimation plus efficace.

Une des méthodes la plus utilisée par le passé en ce qui concerne la détermination des pluies ponctuelles exceptionnelles est tout à fait analogue à l'étude statistique directe des débits : elle consiste à ajuster, à un échantillon de pluies journalières à un poste donné, une certaine loi de distribution statistique. Si l'on dispose de plusieurs postes, de préférence indépendants, on peut exécuter la même étude pour chacun d'eux et se donner une distribution ayant des caractéristiques statistiques moyennes pour la région (méthode inspirée de celle des stations-années). De tels procédés gardent actuellement toute leur valeur dans la mesure où on dispose d'échantillons de pluie assez importants. GUILLOT, avec sa méthode du gradex, rejoint cette conception : simplement, il suppose que le comportement asymptotique des lois de distribution est exponentiel.

Assez récemment, les Américains, et surtout les Australiens, ont mis au point une méthode d'estimation de ce qu'ils appellent la précipitation maximale probable, basée sur des données météorologiques assez complexes et en particulier sur des sondages aérologiques. En fait, la méthode complète des P M P admet des simplifications pour s'adapter aux données disponibles, étant bien entendu que la précision de l'estimation va en s'amenuisant à mesure que l'on simplifie le procédé. On peut ainsi arriver à une simplification extrême qui est recommandée par l'O.M.M. (Rainbird) : on constitue un échantillon de toutes les pluies maximales annuelles en 24 heures. On prend la valeur moyenne de l'échantillon et on lui ajoute 15 fois son écart-type ; on admet que cela correspond à la précipitation maximale probable pour la station considérée.

Il existe des procédés de forme empirique pour passer des précipitations ponctuelles journalières à une distribution plus fine dans le temps de ces précipitations de manière à constituer, non plus une P M P, mais un hyétogramme maximal probable. Lorsque l'épisode pluvieux intéressant pour le bassin couvre plusieurs jours, la méthode des P M P n'est plus guère utilisable, on peut alors employer des méthodes de hyétogramme-enveloppe dont la théorie n'est pas très au point.

L'extension à la surface des pluies ponctuelles ainsi définies n'est pas aisée. Fort heureusement, le bon sens en la matière permet souvent d'éviter le pire. Une des premières méthodes utilisées consistait dans ce que les Américains appellent la méthode des stations-années-surfaces fréquences. C'est une méthode très compliquée, qui implique un certain nombre d'hypothèse auxquelles on peut ne pas souscrire. Pour les petites surfaces, nous avons mis au point une théorie, de l'abattement assez rigoureuse du point de vue théorique, mais qui demande une masse assez considérable de mesures. Pour les grandes surfaces, la meilleure méthode consiste encore à utiliser des schémas d'averses existantes et à les transposer en précipitations maximales probables.

#### CONCLUSION

L'estimation des crues de fréquence rare fait appel à tout un arsenal méthodologique dont certains points paraissent actuellement bien acquis et dont d'autres sont encore du domaine de la recherche. Il faut bien se garder de jeter l'exclusif sur tel ou tel procédé tout en refusant d'entendre parler des autres. Ce qui est en fait le plus difficile, c'est de penser le problème dans chaque cas particulier compte tenu à la fois des dispositions naturelles du bassin et les données disponibles tant en pluviométrie qu'en hydrométrie. Il convient de donner la priorité absolue d'abord à la mesure directe des débits, puis à la recherche des crues les plus importantes qui peuvent avoir laissé des traces et dont on devra s'efforcer de donner une estimation quantitative .

Lorsqu'on le pourra, on utilisera les méthodes indirectes surtout pour le contrôle des résultats obtenus par ailleurs. De toutes façons, il convient de multiplier le plus possible les précédés d'estimation dans la mesure, bien entendu où ceux-ci restent adaptés au cas étudié, considérant que la décision à prendre en vue de la protection d'un aménagement est plus le résultat d'une convergence de points de vue variés que d'un véritable calcul, même teinté d'imprécision statistique. On doit enfin ajouter qu'une bonne estimation de la crue de projet doit s'effectuer au sein d'un dialogue avec le projeteur chargé du Génie Civil; il faut absolument que les responsables des aménagements perdent l'habitude de rechercher un absolu en la matière.



Roche Marcel.

Problèmes méthodologiques relatifs à la connaissance des crues. In : Etudes de l'eau.

Paris : ORSTOM, 1972, 21 p. multigr. Journées Eureau, Strasbourg (FRA), 1972/03.