

Détermination de la capacité  
des évacuateurs de crues des barrages

Enquête faite par la COMMISSION  
INTERNATIONALE des GRANDS BARRAGES

ELECTRICITE de FRANCE

(I.G.E.C.O.)

OFFICE de la RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
et TECHNIQUE OUTRE-MER

**PREVISION des CRUES**

**Méthodes employées**

par les hydrologues de l'Inspection Générale pour la Coopération  
hors métropole (I.G.C.) et de l'Office de la Recherche Scientifique  
et Technique Outre-Mer et quelques exemples d'application

La prévision statistique des crues à prendre en compte pour le calcul des évacuateurs a relativement peu évolué dans les dernières années, en dépit des progrès enregistrés dans les modèles de transformation pluies-débits. Ceci est dû principalement aux raisons suivantes :

- La méthodologie semble quelque peu piétiner par suite des très grandes difficultés rencontrées dans l'interprétation des résultats des études statistiques.
- L'attention des maîtres d'œuvre semble plus attirée par la prévision statistique des sports et par la prévision chronologique des crues et des apports (notamment pour le remplissage des barrages et les consignes d'exploitation).

Dans ce domaine, les hydrologues de l'IGSO et de l'ORSTOM ont fait souvent du "coup par coup", sans entreprendre, de façon systématique, des recherches susceptibles de conduire à l'élaboration d'une doctrine générale du problème des crues. A notre connaissance, une telle recherche n'a pas encore été abordée dans le monde et, en tout cas, si elle l'a été, n'a certainement pas encore abouti. En fait, dans certains domaines, tel celui des petits bassins, une méthodologie assez complète a été mise au point par nous, mais ceci ne couvre qu'un des aspects du problème.

Avant tout développement, nous aimerions attirer l'attention sur un point qui nous paraît capital pour la compréhension même du problème du calcul de l'évacuateur. Un maître d'œuvre peut adopter l'une des deux attitudes suivantes :

- admettre, même avec une faible probabilité, la possibilité de destruction de l'ouvrage, auquel cas les méthodes statistiques usuelles peuvent éventuellement convenir ; elles fournissent un débit correspondant à une fréquence déterminée ;
- réclamer une sécurité absolue, ou réputée telle ; c'est alors le problème de la crue impossible que l'on essaie assez maladroitement d'aborder par le biais d'une étude statistique simple, en s'imposant des fréquences extrêmement faibles (par exemple dix-millièmes) que l'on considère pratiquement comme nulles. Des méthodes consistant à "maximiser" des épisodes pluvieux et à les transformer en crues au moyen d'un modèle mathématique semblent beaucoup plus logiques.

Dans ce texte prévisoire, nous indiquerons brièvement quelles sont les techniques que nous avons utilisées jusque là, quel est notre domaine de recherches actuel et quels sont nos projets d'avenir. Nous soulignerons au passage les principales insuffisances de ces techniques.

## 1 - METHODES FONDAMENTALES STATISTIQUES

Une méthode purement statistique pour l'étude d'un aspect d'un phénomène consiste essentiellement :

- à définir de façon très stricte une variable aléatoire, ou variate, décrivant "utilement" cet aspect du phénomène pour le but que l'on se propose. Ce sera par exemple le débit maximal instantané de l'averse, souvent assimilé au débit moyen journalier maximal si le bassin versant est de grande taille ;
- à constituer un échantillon de cette variate aussi grand que le permettent les observations effectuées à la station située à l'emplacement du bassin considéré (emplacement de l'ouvrage). Les observations directes peuvent être complétées ou remplacées par des évaluations sur lesquelles nous reviendrons tout à l'heure ;
- à rechercher une loi de probabilité susceptible de représenter la distribution de l'échantillon ainsi rassemblé. Les paramètres de la loi sont ajustés de manière à satisfaire le mieux possible à la distribution observée, suivant un critère donné le plus souvent par utilisation du "maximum de vraisemblance" ou à partir des moments ; d'autres critères peuvent être envisagés.

La loi de distribution étant établie, on dispose d'une fonction bi-univoque permettant de faire correspondre à une fréquence de dépassement donnée une seule valeur de la variate et inversement :

$$F_1 = \int_x^{+\infty} f(x) dx .$$

C'est du moins ce qui serait souhaitable, mais en réalité le problème se complique du fait que les paramètres calculés ne sont que des estimations des vraies valeurs de ces paramètres. Il en résulte que chaque quantile calculé avec la loi de probabilité ainsi déterminée est lui-même une variable aléatoire dont la dispersion dépend notamment de la taille de l'échantillon et de la dispersion propre de la variate originale. Ce phénomène de

distribution statistique du quantile est appelé "fluctuation d'échantillonnage" ; il se traduit par la notion d'intervalles de confiance. La valeur de la crue exceptionnelle déterminée par une relation bilinéaire même parfaitement valable doit donc être considérée comme comprise dans un intervalle de confiance et non comme un chiffre précis, définitif, comme le croient bon nombre d'ingénieurs hydrauliciens.

Cet intervalle, lié lui-même à une probabilité (ou seuil de confiance) représentative du risque supplémentaire que le maître de l'œuvre juge acceptable d'assumer, se calcule aisément dans le cas d'une loi normale. Dans les autres cas, notamment si la loi est asymétrique, le calcul est plus difficile et parfois quasi impossible ; on peut alors faire appel à des méthodes de simulation (MONTÉ-CARLO) pour construire "empiriquement" la distribution liée à la fluctuation d'échantillonnage.

Si l'on était sûr que la loi choisie fût la vraie loi de distribution de la variable originale, toute la dispersion à laquelle on pourrait s'attendre serait exprimée par l'intervalle de confiance. En fait, il est absolument impossible de construire a priori la loi de probabilité d'un tel phénomène et l'on doit donc procéder à un choix "empirique", d'où le risque d'une erreur supplémentaire dite d'insadéquation. On est guidé dans ce choix par l'utilisation des tests statistiques. Pour tester la valeur d'une distribution au voisinage des valeurs centrales de la variable, disons jusqu'à la fréquence décimale dans le cas de variables peu dispersées, le test bien connu du  $\chi^2$  paraît donner satisfaction. Mais si l'on s'intéresse aux valeurs extrêmes, ce test n'a plus guère de signification par suite notamment de la nécessité, en vue de son application, de diviser l'échantillon en classes comportant un minimum de 5 valeurs. D'autres tests sont heureusement plus efficaces, tels que celui de HENDRICKSON-GRENIER et celui de GRAMM-VON MISES, mais d'application plus laborieuse par suite du fait qu'il est difficile de s'en procurer les tables ; l'introduction du calcul automatique dans nos Services généralisera probablement l'utilisation de ces tests.

(u) Les erreurs d'estimation dues à la fluctuation d'échantillonnage et, à moindre degré, à l'insadéquation de la loi choisie, sont généralement beaucoup plus importantes que les erreurs d'établissement. Il peut toutefois se faire en certains cas, notamment si l'extrapolation de la courbe hauteur-débits est très importante ou si la loi hauteur-débits n'est pas univoque, que l'erreur due à l'établissement prenne des valeurs inhabituelles. Rappelons que pour trois stations importantes des jaugeages effectués pour des crues d'ordre décennal ont mis en évidence des erreurs de plus de 50 % sur des courbes précédemment extrapolées (HENDRICKSON, VILLERA et MURAHARA).

De toute manière, on doit toujours pour une étude de crues s'assurer les meilleures conditions d'échantillonnage. Les erreurs de ce type sont indépendantes de la méthodologie adoptée pour l'étude des crues exceptionnelles et il n'en sera plus fait état dans la suite de cet exposé. De même, nous ne nous arrêterons pas sur les erreurs d'estimation pouvant provenir de la connaissance imparfaite des hauteurs à l'échelle.

On a supposé jusqu'à présent que les débits étaient connus au site même du barrage. S'il n'en est pas ainsi, on doit procéder à un calcul intermédiaire de corrélation, soit en interpolation, soit en extrapolation, ce qui a évidemment pour effet d'augmenter la dispersion.

Les méthodes purement statistiques ne sont utilisables que lorsqu'on possède un échantillon assez grand et que la connaissance de la distribution d'une seule variable est suffisante pour décider du dimensionnement de l'évacuateur ; autrement dit au fil de l'eau ou à faible réserve incapable d'assurer un laminage intéressant de la crue, en égard à la forme de cette dernière. Il arrive cependant, lorsqu'il n'est pas possible d'utiliser d'autres méthodes, qu'on adopte le maximum trouvé à une forme de crue évaluée par ailleurs ; la méthode n'est pas à prescrire, mais elle permet un contrôle moins sûr des données du problème et demande que l'on se réserve des limites de sécurité importantes en ce qui concerne la forme.

Il y a bien des possibilités, au moins théoriques, d'aborder le problème de l'évolution des débits durant une crue par des études de chroniques (fonctions aléatoires). Mais les difficultés sont telles, tant sur le plan théorique que sur le plan calcul, que nul n'a encore osé s'y attaquer autrement que sous forme de débat académique.

Des études de crues par des méthodes purement statistiques sont effectuées par nos services sur la plupart des fleuves importants d'Afrique Noire d'expression française, fleuves qui présentent des caractéristiques de régularité facilitant l'emploi de lois statistiques avec des échantillons restreints.

2 - RELATIONS PLUIES-DEBITS - MODELES MATHEMATIQUES

L'étude de la pluie en application des relations ou opérateurs pluie-débits est pour objet d'augmenter l'échantillon des débits observés en s'appuyant sur les observations pluviométriques. L'étude statistique est ainsi reportée sur les pluies ; elle est précédée d'une opération semi-déterministe qui est censée représenter le mécanisme de transformation des pluies en débits.

Le passage des probabilités de pluies aux probabilités de crues peut être effectué de deux façons : ou bien effectuer le passage direct de la loi de probabilité des pluies à la loi de probabilité des crues, ce qui conduit souvent à des calculs inextricables, ou bien constituer un échantillon étendu de crues à partir des précipitations et du modèle de transformation, et faire l'étude statistique des crues sur le nouvel échantillon. Dans la pratique, on emploie souvent une troisième méthode approchée qui consiste à considérer l'averse de la même fréquence que celle de la crue que l'on veut calculer, on s'impose un certain nombre de conditions pour les facteurs secondaires de l'averse (répartition spatiale et temporelle, humidité préalable, etc...), on vise d'éviter, dans la mesure du possible, l'introduction d'erreurs systématiques, ce qui est souvent difficilement contrôlable ; l'utilisation du modèle permet de calculer la crue correspondante. Cette méthode est beaucoup moins critiquable quand elle s'applique au calcul de la crue correspondant à la précipitation maximale probable.

Ces relations ou opérateurs existent et sont étudiés en dehors de toute préoccupation de calcul pratique des crues. Ils peuvent s'appliquer aussi bien à la prévision statistique des crues et des apports, qu'à une prévision chronologique des mêmes éléments. Cependant c'est peut-être dans ce domaine qu'en hydrologie les cas particuliers, se traduisant par des modèles spécifiques, sont le plus appréciés par suite des énormes simplifications qu'ils sont susceptibles d'apporter par rapport à un modèle général de transformation. Pour ne pas nous écarter du sujet, nous examinerons uniquement les méthodes utilisées par nos services et débouchant sur la prévision statistique des crues.

En passant sur des "astuces" trop particulières qui ne se rapportent qu'à des cas exceptionnels, on peut diviser les méthodes de transformations pluie-débit en deux grandes classes applicables suivant notamment la superficie du bassin. On dira en gros que les petits bassins relèvent de méthodes dites "globales", tandis que les grands bassins peuvent être traités au moyen de méthodes dites "structurales". Ajoutons que la notion de superficie est toute relative, les limites des deux types de méthodes dépendant de l'hétérogénéité spatiale à la fois dans le domaine climatique et dans le domaine géomorphologique.

2.1. Modèles globaux

Ils consistent à traiter "en bloc" le bassin et l'averse en une fraction de l'averse. Autrement dit, on ne prend en compte que des caractéristiques de l'averse "moyennes" sur l'ensemble du bassin et on considère que toutes les parties de ce dernier réagissent toujours de la même manière les unes par rapport aux autres. Toutes les techniques relatives aux opérateurs globaux se ramènent, avec des variantes plus ou moins marquées, à celle de l'hydrogramme unitaire.

Le passage des probabilités de pluies aux probabilités de crues peut être effectué de deux façons : ou bien effectuer le passage direct de la loi de probabilité des pluies à la loi de probabilité des crues, ce qui conduit souvent à des calculs insurmontables, ou bien constituer un échantillon étendu de crues à partir des précipitations et du modèle de transformation, et faire l'étude statistique des crues sur le nouvel échantillon. Dans la pratique, on emploie souvent une troisième méthode approchée qui consiste à considérer l'averse de la même fréquence que celle de la crue que l'on veut calculer, en s'imposant un certain nombre de conditions pour les facteurs secondaires de l'averse (répartition spatiale et temporelle, humidité préalable, etc...), en vue d'éviter, dans la mesure du possible, l'introduction d'erreurs systématiques, ce qui est souvent difficilement contrôlable ; l'utilisation du modèle permet de calculer la crue correspondante. Cette méthode est beaucoup moins critiquable quand elle s'applique au calcul de la crue correspondant à la précipitation maximale probable.

Ces relations ou opérateurs existent et sont étudiés en dehors de toute préoccupation de calcul pratique des crues. Ils peuvent s'appliquer aussi bien à la prévision statistique des crues et des apports, qu'à une prévision climatologique des mêmes éléments. Cependant c'est peut-être dans ce domaine qu'en hydrologie les cas particuliers, se touchant par des modèles spécifiques, sont le plus appréciés par suite des diverses simplifications qu'ils sont susceptibles d'apporter par rapport à un modèle général de transformation. Pour ne pas nous écarter du sujet, nous examinerons uniquement les méthodes utilisées par nos services et débouchant sur la prévision statistique des crues.

En passant sur des "cas" trop particuliers qui ne se rapportent qu'à des cas exceptionnels, on peut diviser les méthodes de transformations pluie-débit en deux grandes classes applicables suivant notamment la superficie du bassin. On dira en gros que les petits bassins relèvent de méthodes dites "globales", tandis que les grands bassins peuvent être traités au moyen de méthodes dites "régionales". Ajoutons que la notion de superficie est toute relative, les limites des deux types de méthodes dépendant de l'hétérogénéité spatiale à la fois dans le domaine climatique et dans le domaine géographique.

## 2.1. - Méthodes régionales

Elles consistent à traiter "en bloc" le bassin et l'averse en une fraction de l'averse. Autrement dit, on ne prend en compte que des caractéristiques de l'averse "moyennes" sur l'ensemble du bassin et on considère que toutes les parties de ce dernier réagissent toujours de la même manière les uns par rapport aux opérateurs globaux se rattachant, avec des variantes plus ou moins marquées, à celle de l'hydrogramme unitaire.



Rappelons que la méthode de l'hydrogramme unitaire est basée sur les hypothèses de base suivantes :

- Une averse dite "unitaire", c'est-à-dire de durée très inférieure au temps de réponse du bassin, donne lieu à une crue de ruissellement élémentaire de forme et de durée constantes.
- Si on appelle "hauteur efficace" la partie de l'averse qui ruisselle effectivement, les volumes des hydrogrammes ruisselés correspondant à deux averses unitaires sont dans le rapport des hauteurs efficaces de ces averses.
- L'hydrogramme de ruissellement d'une averse de longue durée s'obtient en fractionnant cette averse en averses unitaires, en déterminant pour chacune de ces averses unitaires la hauteur efficace et l'hydrogramme élémentaire afférent, puis en cumulant les ordonnées de tous ces hydrogrammes élémentaires.

L'ORSINI a très largement utilisé la technique de l'hydrogramme unitaire qui lui a servi à analyser les résultats obtenus sur environ 170 bassins représentatifs groupés en 90 ensembles et situés principalement en Afrique Noire francophone. Cet important matériel a permis d'élaborer un travail de synthèse constituant une première approximation pour le calcul des crues sur petite bassin.

Une note publiée par M. AUVRAY et BODIER résume les résultats de cette première synthèse et donne des règles pratiques pour le calcul effectif des crues. Ce calcul est basé sur les caractéristiques des averses et des crues décennales ; il s'appuie sur l'estimation des paramètres suivants :

- Coefficient d'abattement
- Coefficient de ruissellement  $K_R$
- Temps de base  $T_b$
- Coefficient de forme  $K$  ou  $\alpha$  = débit maximal/débit moyen.

Le problème du coefficient d'abattement a été définitivement réglé par une étude de Y. HENNET-JENNET et M. ROCHE. Le coefficient de ruissellement est donné par des abaques en fonction de la pente caractérisée par un indice  $R$  pouvant prendre les valeurs 1 à 6, de la perméabilité du sol caractérisée par un indice  $P$  pouvant prendre les valeurs 1 à 5, et de la surface du bassin. Le temps de base est donné par d'autres abaques en fonction de la superficie du bassin et de l'indice  $R$ . La note fournit également des abaques concernant le temps de montée et donne des indications sur les valeurs à adopter pour le



Rappelons que la méthode de l'hydrogramme unitaire est basée sur les hypothèses de base suivantes :

- Une averse dite "unitaire", c'est-à-dire de durée très inférieure au temps de réponse du bassin, donne lieu à une crue de ruissellement élémentaire de forme et de durée constantes.
- Si on appelle "hauteur efficace" la partie de l'averse qui ruisselle effectivement, les volumes des hydrogrammes ruisselés correspondant à deux averses unitaires sont dans le rapport des hauteurs efficaces de ces averses.
- L'hydrogramme de ruissellement d'une averse de longue durée s'obtient en fractionnant cette averse unitaire, en déterminant pour chacune de ces averses unitaires la hauteur efficace et l'hydrogramme élémentaire afférent, puis en sommant les ordonnées de tous ces hydrogrammes élémentaires.

L'ORSTOM a très largement utilisé la technique de l'hydrogramme unitaire qui lui a servi à analyser les résultats obtenus sur environ 170 bassins représentatifs groupés en 90 ensembles et situés principalement en Afrique Noire francophone. Cet important matériel a permis d'élaborer un travail de synthèse constituant une première approximation pour le calcul des crues sur petits bassins.

Une note publiée par MM. AUVRAY et ROCHE résume les résultats de cette première synthèse et donne des règles pratiques pour le calcul effectif des crues. Ce calcul est basé sur les caractéristiques des averses et des crues déennales ; il s'appuie sur l'estimation des paramètres suivants :

- Coefficient d'abattement
- Coefficient de ruissellement  $K_R$
- Temps de base  $T_b$
- Coefficient de forme  $K$  ou  $\alpha$  = débit maximal/débit moyen.

Le problème du coefficient d'abattement a été définitivement réglé par une étude de Y. BRISSET-MERET et M. ROCHE. Le coefficient de ruissellement est donné par des abaques en fonction de la pente caractérisée par un indice  $R$  pouvant prendre les valeurs 1 à 6, de la perméabilité du sol caractérisée par un indice  $P$  pouvant prendre les valeurs 1 à 5, et de la surface du bassin. Le temps de base est donné par d'autres abaques en fonction de la superficie du bassin et de l'indice  $R$ . La note fournit également des abaques concernant le temps de montée et donne des indications sur les valeurs à adopter pour le

rapport  $\alpha$ . L'influence de la végétation est prise en compte par la considération de zones climatiques pour lesquelles sont établis les différents abaques.

Cette première interprétation a déjà permis le calcul d'un nombre important d'ouvrages : nous citerons le calcul de points de franchissement d'eau sur la route du DIERI, au SENEGAL, le calcul d'une quarantaine de petits barrages en HAUTE-VOLTA, etc...

Il faut toutefois reconnaître que les possibilités et surtout la précision de cette approche sont limitées. Actuellement, l'ONSTOM est en train d'élaborer des méthodes beaucoup plus complexes basées, d'une part, sur l'analyse factorielle de l'influence des paramètres géomorphologiques, d'autre part, sur des définitions d'éléments standards de l'opérateur de transformation destinées à préciser les conditions de l'extrapolation géographique. La mise en oeuvre de l'analyse factorielle exige la réalisation de campagnes de mesures complémentaires assez importantes dans le domaine de la géomorphologie ; elle est dirigée par P. DUBREUIL. Les recherches concernant l'hydrogramme standard et les autres éléments standards de l'opérateur, s'appuient sur des éléments déjà en notre possession ; elles se poursuivent comme travail de fond dans le département de M. ROCHE.

## 2.2. Opérateurs matriciels

A partir d'une certaine superficie du bassin qui dépend des conditions morphologiques et climatiques (on peut admettre que la limite varie entre 50 et 1 000 km<sup>2</sup>), il n'est plus possible de retenir l'hypothèse d'une réaction globale du bassin. Il faut alors morceler ce dernier de manière à traiter séparément chaque parcelle pour regrouper ensuite les résultats à l'échelle du bassin.

Les premières tentatives effectuées en France dans cette voie sont dues à M. LARREU qui, à l'époque, avait assez curieusement donné à sa méthode le nom d'hydrogramme synthétique. De nombreuses méthodes dérivées, toutes basées sur la décomposition du bassin en zones isochrones ont vu le jour depuis. Il y a environ deux ans, M. ROCHE a repris le problème à la base en élaborant des équations théoriques assez complètes de ruissellement, équations dont le passage aux différences finies débouche sur une méthode possible de calcul qu'il a appelé "opérateur matriciel". Une caractéristique essentielle de cette méthode est l'établissement d'une "matrice caractéristique du bassin" obtenue par l'intersection du découpage en zones isochrones avec le découpage en polygones de THISSON (zones d'influences des pluviomètres ou des pluviographes).

La grande difficulté d'application des méthodes matricielles réside en la complexité des calculs. Les premiers essais, à l'intérieur de nos services, ont été effectués "à la main", c'est-à-dire avec des machines à calculer classiques, sur des modèles extrêmement simplifiés. C'est ainsi qu'on a pu traiter les crues du LITANI (Liban), du NINO (Yogo), du JAGUARIBE (Brésil), etc...

Les premiers essais sur un modèle plus élaboré ont été effectués sur des rivières du CHENE, notamment la Rivière aux CHENES, mais uniquement pour des crues de fontes de neige qui posent des problèmes moins délicats pour l'opérateur de réduction (passage du volume de précipitations au volume de ruissellement). Les renseignements réunis par l'ONTOI sur un bassin du TCHAD, le RAM-RAM, sont en cours d'exploitation en vue de la réalisation d'un modèle mathématique très évolué : il s'agit essentiellement d'une étude méthodologique de recherche fondamentale. A une plus vaste échelle, l'IECO se propose d'établir un modèle mathématique hydropluviométrique complexe pour les crues de la SANAGA.

### 3 - UTILISATION des METHODES MATRICIELLES pour le CALCUL des EVANOUISSEMENTS

Le propre du modèle de transformation, qu'il soit matriciel ou global, est de fournir non pas un maximum de crues, mais la totalité de l'hydrogramme. Cette propriété lui permet d'être utilisé à de nombreuses fins, notamment pour la prévision chronologique à court terme ou à long terme des apports et des crues (modèle dynamique). Pour le calcul des évènements, on peut envisager deux modes d'emploi suivant les préoccupations du maître de l'ouvrage.

#### 3.1. Reconstitution d'un échantillon de crues

Le modèle permettant la transformation de tout épisode pluvieux en chronique de débits, il est possible, si l'on dispose d'une période d'observations pluviométriques relativement importante, de reconstituer une période à peu près équivalente de débits, et entre autres, de crues.

Comme on l'a déjà dit plus haut, l'étude statistique directe de l'échantillon ainsi obtenu, qui ne pourrait être faite qu'en s'appuyant sur la théorie des fonctions aléatoires, est pratiquement hors de question, sauf en des cas très particuliers pour lesquels l'intervention d'un modèle mathématique complexe est d'ailleurs inutile.

Par contre, rien n'empêche une disposition de l'ouvrage étant arrêtée, de simuler le fonctionnement de l'aménagement sur la période obtenue par l'extension des débits observés à partir des pluies et au moyen du modèle, de se fixer une variable caractéristique, par exemple le débit maximal observé chaque année à l'évacuateur au cours de l'opération de simulation, puis d'étudier

statistiquement l'échantillon de cette variate ainsi obtenu. On est ramené ainsi à l'étude statistique pure, et tout ce qui a été dit au paragraphe 1 de cette note est valable, en particulier en ce qui concerne l'interprétation des résultats et la considération des intervalles de confiance. Bien entendu, dans la réalité, on ne fera pas une seule simulation mais toute une série en faisant varier les conditions de l'aménagement.

On voit donc que cette méthodologie transpose, sur le plan des ouvrages "à réservoir", la méthodologie de l'étude statistique pure des maxima annuels utilisable pour les aménagements au fil de l'eau. Elle implique par conséquent que le maître de l'œuvre accepte d'encourir une chance non totalement nulle de voir son ouvrage détruit.

### 3.2. Recherche de la crue impossible

Elle présuppose que l'on a un moyen de déterminer sur le bassin une pluie ou un épisode pluvieux réputés impossibles. Les méthodes de maximisation des pluies sont dues principalement aux Américains et requièrent des mesures assez complètes, notamment dans le domaine de l'hydrologie. Comme nos services n'ont encore jamais pratiquement utilisé de telles méthodes, notamment parce que dans notre champ d'action traditionnel nous ne disposons pas de renseignements suffisants, nous n'insisterons pas.

Lorsqu'il était nécessaire, nous avons abordé le problème de la maximisation des épisodes pluvieux par le biais de "hydrogrammes enveloppes" dont la technique est complexe et à vrai dire assez incertaine ; mais c'est là une méthodologie dont on est à peu près sûr qu'elle va toujours dans le sens de la sécurité. Le risque est alors plutôt de concevoir des ouvrages démesurément gigantesques si on ne procède pas à une étude détaillée de la structure des épisodes pluvieux et de leur extension géographique. Nous pensons que, bien manipulée, la méthode est valable, malgré la difficulté de tester la valeur des résultats.

On notera au passage que la "crue impossible", pour curieuse que paraisse sa gerbe, n'est pas soumise aux mêmes difficultés d'interprétation que les crues de différentes probabilités calculées par une méthode statistique ; en particulier, si elle admet des erreurs d'estimation, ses erreurs, d'ailleurs quantiquement impossibles à cerner, ne peuvent pas être traitées en termes d'intervalles de confiance. Tout au moins pas dans l'état actuel d'avancement des recherches, car il est bien probable que l'évaluation des connaissances en matière d'hydrologie ramènera un jour les "crues impossibles" dans le giron de la statistique.

On peut grouper avec ces méthodologies l'utilisation des diagrammes de courbes enveloppes. Rappelons qu'un tel diagramme est établi en peignant sur un papier log-log, en abscisses les surfaces des bassins versants, en ordonnées les crues maximales observées aux stations correspondantes et ceci pour le maximum de stations disponibles dans le monde. La courbe enveloppe est la droite passant au-dessus de tous les points obtenus. Il faut reconnaître que, sous cette forme, cette courbe n'a pas grande utilité et ne constitue nullement une méthode d'évaluation de crue maximale pour un bassin donné. Récemment, J. FRANCOU a apporté à ce diagramme une amélioration décisive en introduisant un coefficient  $K$  jouant le rôle de caractéristique régionale ; sous cette forme, le diagramme donne des possibilités de recoupements et peut, en l'absence de toute autre source de renseignements, être utilisé pour la prédétermination des crues, mais son véritable intérêt réside essentiellement dans le classement rationnel des crues maximales à l'échelle du globe et par suite la détermination des régions où les crues sont les plus dangereuses.

#### 4 - Perspectives d'avenir

Nous groupons en vrac dans ce paragraphe les sujets de recherche, concernant les crues, qui paraissent devoir, au cours des années à venir, préoccuper les ingénieurs et chercheurs de l'ORSTOM et de l'HECO.

En premier lieu, les modèles mathématiques hydropluviométriques. C'est une opération qui en est à sa phase initiale de démarrage et qui sera prioritaire pendant deux ou trois ans au sein du département de la recherche fondamentale du Service Hydrologique de l'ORSTOM. L'objectif final est d'obtenir un modèle général, avec, à la rigueur, deux ou trois variantes, muni d'un dispositif de réglage automatique des paramètres. Au cours des différentes opérations, tous les aspects du problème seront envisagés, notamment en ce qui concerne la théorie du coefficient de ruissellement.

Les notions préparatoires à l'analyse factorielle géomorphologique et pédologique sur bassins représentatifs sont déjà assez avancées et on peut prévoir le démarrage des opérations d'analyse à proprement parler dans un délai d'un an à un an et demi. Parallèlement se continueront les recherches sur l'hydrogramme standard qui constituent un préalable de l'analyse factorielle.

A plus longue échéance, nous envisageons de nous pencher sur les questions économiques soulevées par le problème des crues. Il est en effet normal de ne pas envisager, dès l'étude hydrologique, les conséquences que l'évaluation des crues peut entraîner pour l'économie générale des aménagements. En particulier, les notions d'intervalles de confiance ne prennent toute leur signification que si on les intègre dans le contexte économique.

5 - Phénomènes particuliers résultant de la création de réservoirs

On a souvent tendance à considérer qu'après aménagement d'un barrage la crue doit être considérée tout d'abord comme si le barrage n'existait pas (il s'agit donc d'une crue naturelle), puis par le jeu du remplissage du réservoir et des divers types de vannes ou d'ouvrages évacuateurs dont le barrage est pourvu, on modifie l'hydrogramme de la crue naturelle. En fait, la création du réservoir apporte dans le processus naturel d'autres perturbations dont il convient parfois de tenir compte. Nous citerons deux exemples :

a) Le barrage de RINCÓN del BONETE sur le RIO NEGRO (Uruguay) avait noyé une plaine alluviale où autrefois la rivière et ses affluents circulaient au milieu de galeries boisées dont l'effet de freinage sur le courant n'était pas négligeable. La création du réservoir a augmenté considérablement la vitesse de transport et fait coïncider les maxima de crues de plusieurs affluents qui étaient décalés avant construction du barrage. Il en résulte qu'actuellement si, pour chaque crue, on procède à la reconstitution des débits naturels, on tenant compte en premier lieu des variations du niveau du barrage, on retrouve non pas le débit maximal tel qu'il se serait produit avant construction du barrage mais ce même débit majoré d'un coefficient égal à 25 %. Ce calcul a été fait pour la grande crue d'Avril 1959 qui a dépassé par dessus mesure et pour laquelle il a été nécessaire de faire sauter une digue secondaire pour sauver le barrage. La crue reconstituée en tenant compte de l'effet d'accélération des débits de transmission dans la retenue aurait présenté une valeur maximale de 16 000 à 18 000 m<sup>3</sup>/s (pour 39 700 km<sup>2</sup>), alors que dans les conditions naturelles elle aurait été voisine de 13 000 m<sup>3</sup>/s, comme on a pu le calculer. Bien entendu, le laminage de la crue par le réservoir ramène cette valeur maximale à une valeur comprise entre 9 000 et 11 000 m<sup>3</sup>/s.

b) Un autre phénomène peu connu a été observé sur le réservoir créé sur la RIA, en Coto d'Espeiro, par le barrage d'AYAPE I. A la crue de retenue normale, le volume accumulé est de  $1,175 \times 10^9$  m<sup>3</sup>. Le 4 Août 1963, alors que les travaux sur le chantier du barrage d'AYAPE II en construction à l'aval interdisaient de lâcher à AYAPE I plus de 350 m<sup>3</sup>/s, le niveau à ce dernier barrage montait de 8 cm en 4 heures. En tenant compte du débit évacué par le déversoir et les turbines et du volume mis en réserve derrière le barrage, le débit calculé pendant ces 4 heures était de 1 450 m<sup>3</sup>/s alors que l'ensemble des ouvrages avait été prévu pour une crue maximale de 1 200 m<sup>3</sup>/s. Une forte pluie était tombée sur la retenue et une crue importante se produisait à l'amont. Mais au barrage il était difficile de séparer l'influence des deux et l'inquiétude avait été assez vive.



Le plus tôt possible, on a cherché à faire le point sur cette crue, ce qui heureusement a été assez facile. En effet, le débit de la RIA avait pu être mesuré à son maximum en amont de la retenue ; le débit était inférieur à 250 m<sup>3</sup>/s au moment correspondant à la vitesse maximale de montée des eaux au barrage, donc elle n'était responsable que d'une petite partie de la montée.

On peut avoir une idée de l'influence de la pluie grâce à un pluviomètre enregistreur installé au barrage. Cet appareil avait reçu 30 mm entre 12 et 18 h et 51 mm entre 18 et 20 heures. Sur les 8 cm de montée, l'averse pouvait donc être responsable de 1,5 cm. Au total, le débit provenant de la rivière principale et des petites tributaires directes correspondait à une surélévation du plan d'eau de 2,5 cm plus le débit passant par le barrage, soit au total 700 m<sup>3</sup>/s. Par contre, pendant les 7 heures suivantes, le débit naturel a atteint 900 m<sup>3</sup>/s au moins provenant surtout des petites tributaires. On voit que la précipitation tombant directement sur le lac est responsable en définitive d'une majoration de plus de 500 m<sup>3</sup>/s. On peut facilement concevoir dans cette région une averse de 150 mm en 3 heures qui, par la surélévation du plan d'eau qui en résulterait, correspondrait à une crue "fictive" de 2 700 m<sup>3</sup>/s, chiffre auquel on ne pourrait aboutir bien entendu par les calculs de crue. En fait, c'est bien cependant cette surélévation du plan d'eau qui agirait sur le mécanisme d'ouverture des vannes, si ces vannes étaient munies d'un dispositif de commande automatique. On constate donc qu'un automate, dans ce cas, est susceptible de limiter la crue maximale dont est capable l'évacuateur, à moins de le concevoir comme un véritable "cerveau" qui prendrait en compte les données fournies par un pluviomètre enregistreur en même temps que celles du limnimètre de la retenue... C'est ce que fit l'ingénieur du chantier qui put ainsi limiter cette crue au débit de 350 m<sup>3</sup>/s qui sauvegardait son chantier aval.

## 6 - Quelques exemples d'estimation de débits de crues exceptionnelles

Il n'est pas très fréquent de bénéficier, sous les tropiques, de conditions permettant de calculer les débits de crue par des études statistiques très approfondies. Les séries relativement longues d'observations ne sont disponibles que sur les grands fleuves navigables, peu propices aux aménagements hydroélectriques de moyenne importance. Nous avons cependant été amenés à calculer la crue exceptionnelle du CHARI à FOUH-LANG pour un projet de pont, puis pour la protection de la ville contre les débordements du fleuve. La première étude faite en 1956 supposait une distribution subversive une loi de GOURBIN, avec une crue centennale de 5 200 m<sup>3</sup>/s. Cette valeur, calculée avec un échantillon de 16 ans, avait été donnée sans intervalle de confiance, cette notion n'étant pas encore entrée dans les mœurs à l'époque,



tout au moins pour les calculs de crue. Depuis, on a constaté qu'il était possible d'utiliser une distribution normale et on a réussi à porter l'échantillon de crues observées à 96 années grâce à une corrélation avec les niveaux du Lac TCHAD. Le résultat direct du calcul a conduit à  $5\ 750\ m^3/s$  pour la crue centennale. La différence de 10 % entre les deux valeurs calculées à deux ans d'intervalle est restée heureusement dans la marge de sécurité du calcul du pont.

On aurait pu espérer pour le COUNCO trouver une distribution statistique particulièrement simple. Nous n'avions étudié aucun projet sur le fleuve proprement dit mais, en crue, le remous du fleuve arrivait au niveau de la restitution du canal de la Centrale de DJGUE près de BRAZZAVILLE, aménagée sur un petit affluent. Le 17 Décembre 1961, le COUNCO atteignait la cote 6,26 m (correspondant à  $75\ 000 - 100\ 000\ m^3/s$ ) à l'échelle de LAFOLVILLE-Est alors que sur une période de 60 ans le maximum observé, en 1908, avait été de 5,17 m et, dans ces conditions, la salle des machines de l'usine du DJGUE avait été sérieusement menacée, il avait été nécessaire de prévoir la mise en place de dispositifs provisoires de protection. Nous avons cherché quelle pouvait être la fréquence de cette crue, nous n'avons trouvé aucune loi statistique permettant un ajustement valable. Les raisons en sont les suivantes : la plupart des grands fleuves d'Afrique tropicale présentent des crues monogéniques. Une forte crue est due à une saison des pluies abondante sur l'ensemble du bassin. Sur le COUNCO dont le régime est complexe, les crues peuvent être polygéniques : en 1961, c'est la conjonction, peu fréquente, des crues des 3 composants : CUBANGUI, COUNCO et KASSAI, qui a donné lieu au caractère exceptionnel de cette crue. En outre, les valeurs maximales de deux années successives ne sont pas obligatoirement indépendantes. On l'a bien vu lors de la crue de 1962 où des conditions générales d'écoulement correspondant à une crue assez forte, mais non exceptionnelle, ont donné lieu à un maximum voisin de celui de 1961 pour la simple raison que la plupart des grands lacs du bassin congolais étaient restés à un niveau élevé. Pour ces deux raisons il a paru très difficile de procéder à une étude statistique approfondie du fleuve et on s'est contenté de constater que la crue de 1961 correspondait à une période de retour supérieure à 100 ans.

Plus généralement, les durées d'observations trop courtes nous obligent à doubler les études statistiques directes par d'autres procédés.

Par exemple, pour le futur barrage de KESSOU sur le BAMBANA (Côte d'Ivoire - bassin versant :  $32\ 400\ km^2$ ), un simple essai d'études statistiques directes portant sur un échantillon de 10 années (1953 à 1962) observées à la station de jaugeage de la route de BISSI ( $26\ 200\ km^2$ ), avait conduit à une crue dix-milliénaire de  $2\ 800\ m^3/s$ , soit  $3\ 250\ m^3/s$  à KESSOU. On avait ajusté une relation gauss-logarithmique. Il avait été tenu compte

qualitativement de la crue de 1933 dont le débit avait pu être reconstitué. Mais même pour une distribution qui ne pouvait conduire qu'à des crues no-  
dées, comme pour tous les cours d'eau de cette région, l'échantillon avait  
paru insuffisant. Deux autres estimations avaient été faites. Tout d'abord,  
comme il s'agit presque d'une crue annuelle, il existe une corrélation entre  
le volume écoulé pendant la saison des pluies pour une année donnée et le  
débit maximal de crue ; il était tentant de chercher à estimer ce volume de  
hautes eaux correspondant à la crue exceptionnelle.

En premier lieu, la dizaine d'années d'observations dont on dis-  
posait a permis d'établir les régressions hydropluviométriques entre pluies  
mensuelles et débits moyens mensuels d'où a été déduit un tableau de débits  
mensuels portant sur 37 ans (durée des observations pluviométriques). A par-  
tir de ce tableau ont été calculés les volumes écoulés de Juillet à Novem-  
bre dont la distribution statistique était normale. La valeur décimillénaire  
débite de la courbe ajustée était de  $11,6 \times 10^9 \text{ m}^3$  à KISSOU. Il a été facile  
de calculer l'intervalle de confiance correspondant à 99 %, la limite supé-  
rieure était de  $14,2 \times 10^9 \text{ m}^3$ . La même étude a été faite sur les pluies cor-  
respondantes conduisant à une hauteur de précipitations moyennes de 1 590 mm  
pour la période Juillet - Octobre. Avec un coefficient d'écoulement de 36 %,  
on obtient un volume de  $17,7 \times 10^9 \text{ m}^3$  (au lieu de 14,2). Finalement, c'est  
le chiffre de  $18 \times 10^9 \text{ m}^3$  qui a été choisi. Avec une forme triangulaire vrai-  
semblable pour l'hydrogramme de crue, on trouve  $3\ 100 \text{ m}^3/\text{s}$  comme débit maxi-  
mal.

D'autre part, une très bonne corrélation (coefficient = 0,983)  
a été trouvée entre la pente maximale de la courbe des précipitations cumu-  
lées (prise sur 10 jours) et le débit maximal. L'échantillon de pentes maxi-  
males comporte 33 valeurs. A l'échantillon de débits correspondants on peut  
ajuster une loi de PEARSON III d'où résulte un débit de crue décimillénaire  
de  $2\ 050 \text{ m}^3/\text{s}$  à KISSOU, soit  $2\ 400 \text{ m}^3/\text{s}$  à KISSOU.

Si on considère un demi-intervalle de 30 % pour l'intervalle de  
confiance à 99 % (on trouvait 22 % pour une distribution normale), on aboutit  
à un débit de crue exceptionnelle de  $3\ 100 \text{ m}^3/\text{s}$ , valeur qui a été retenue en  
définitive.

Mais il arrive que les données disponibles soient encore plus  
réduites : ainsi, sur le projet de barrage de SOUDA sur le NGUIGU (Soudan)  
en 1959, les observations directes portaient sur 7 ans, le débit maximal  
était de  $3\ 330 \text{ m}^3/\text{s}$  en 1953 pour  $56\ 600 \text{ km}^2$ . Une cote exceptionnelle relevée  
en 1950 a permis une reconstitution de débit maximal, soit  $4\ 100 \text{ m}^3/\text{s}$  ; cette

crue n'avait certainement pas été égale depuis 1946, ni entre 1950 et 1953. On a admis sur ce bassin que la crue décennale était de  $4\ 000\ m^3/s$  au maximum, cette valeur correspond bien à ce qui a été observé plus à l'est. Puis pour des bassins versants d'Afrique tropicale, plus grands que  $50\ 000\ km^2$  et pour lesquels il était possible de procéder à des études statistiques, on a étudié le rapport entre crue "dix-millénaire" et crue décennale. Ce rapport était toujours nettement inférieur à 2. C'est cette valeur qui a été adoptée et la crue exceptionnelle a été prise égale à  $8\ 000\ m^3/s$ . Mais étant donné les conditions de calcul, le barrage a été prévu en béton de préférence à tout autre mode de construction plus vulnérable au débordement. Depuis, lors de la grande crue de Mai 1966 (dépassant celle de 1953), des jaugages très précis ont pu être faits par l'ORTOM conduisant à un maximum de  $3\ 560\ m^3/s$ . Il semble maintenant que la crue décennale soit de l'ordre de  $3\ 500 - 3\ 600\ m^3/s$ , mais par prudence, la première valeur estimée pour la crue exceptionnelle a été conservée.

Pour des bassins plus petits, nous utilisons assez fréquemment des modèles matriciels tels que celui de la méthode de LARRIEU. Par exemple au LIBAN, sur le LITANI à KARACUN (bassin versant :  $1\ 545\ km^2$ ), il avait été demandé à EDF d'effectuer un contrôle du débit maximal de crue à prévoir, avant exécution du couronnement de l'évacuateur de crue. L'étude a été menée au moyen d'un modèle matriciel très simplifié, le bassin ayant été découpé en zones homogènes ayant chacune une fonction de variation du coefficient de ruissellement et un temps de transport bien déterminé. Les relevés pluviométriques étaient disponibles à 10 stations dans le bassin et les relevés de débit portaient sur 23 ans. Le modèle a été réglé sur des périodes de 15 jours ; il est apparu clairement deux modes de fonctionnement du bassin, l'un avant 1950 et l'autre après, une enquête de contrôle a montré que ce changement était dû à une amélioration du drainage grâce à des travaux exécutés principalement par le Génie Rural. Puis les deux modèles ont été essayés sur des crues autres que celles qui avaient servi au réglage et un bon accord a été trouvé entre crue observée et crue calculée. L'application de ce modèle pluie - débit à l'épisode pluvieux exceptionnel a conduit à une évaluation du débit de crue exceptionnelle de  $710\ m^3/s$ . L'ouvrage avait été projeté pour  $785\ m^3/s$ .

Pour les très petits bassins, des études portant sur 60 bassins représentatifs ont permis de mettre au point des modèles pluie - débit qui, conjugués avec des études systématiques de précipitations journalières mensuelles, ont permis de donner, pour l'Afrique Occidentale, des normes de calcul pour les bassins de superficie inférieure à  $200\ km^2$ . Dans les cas les plus courants, ces normes sont fréquemment utilisées pour les petits barrages d'hydraulique agricole.

Mais certaines petites cours d'eau tels que ceux de l'île de la REUNION échappent à ce genre de calcul par le caractère impétueux de leurs crues. Par exemple, la rivière LANDEVIN a débité, en 1944, 550 m<sup>3</sup>/s pour 36 km<sup>2</sup>, alors que son débit moyen annuel est de 2,36 m<sup>3</sup>/s. Un aménagement hydroélectrique n'a été réalisé sur cette rivière. Les dispositions de la prise d'eau sont telles que l'ouvrage peut être submergé sous une crue de plus de 1 000 m<sup>3</sup>/s. On utilise fréquemment dans le cas de rivières aussi torrentielles soit les relevés de précipitations maximales dans le monde, soit les courbes enveloppes que J. FRANCOU a mises au point sous une forme particulièrement concise, un coefficient K variant de 0 à 6 définissant le caractère plus ou moins violent des crues. Elles permettent de donner rapidement un premier aperçu des débits de crue pour les régimes torrentiels mal connus et rendent les plus grands services à l'Intérieur de notre Inspection Générale ; elles commencent à intéresser vivement d'autres Organisations extérieures.