

REVUE DE STATISTIQUE APPLIQUÉE

J. JACQUET

Les méthodes statistiques dans les calculs de prédétermination des crues

Revue de statistique appliquée, tome 12, n° 1 (1964), p. 49-61

http://www.numdam.org/item?id=RSA_1964__12_1_49_0

© Société française de statistique, 1964, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « *Revue de statistique appliquée* » (<http://www.sfds.asso.fr/publicat/rsa.htm>) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
<http://www.numdam.org/>

LES MÉTHODES STATISTIQUES DANS LES CALCULS DE PRÉDÉTERMINATION DES CRUES

J. JACQUET

Chef de la DIVISION HYDROLOGIE du Centre de Recherches
et d'essais de Chatou E.D.F.

L'Hydrologie - et singulièrement l'Hydrologie des Crues - est une terre d'élection pour le statisticien. Non seulement parce que la science hydrologique se constitue à partir de séries d'observations dont le traitement ressort de la mise en oeuvre de techniques statistiques mais également - et peut-être surtout - parce que les phénomènes naturels qu'elle étudie (précipitations, débits de cours d'eau notamment) résultent d'une telle complexité de causes que les grandeurs qui les mesurent en un point peuvent être considérées comme des variables aléatoires dont le calcul des probabilités fournit des modèles utiles à leur description. Sans doute les processus physiques de la pluie apportée par le passage d'une perturbation et de la formation d'une onde de crue par le bassin versant d'un cours d'eau doivent être analysés aussi finement que possible afin d'en déterminer les facteurs conditionnels dominants, mais tout hydrologue conscient ne prétendra jamais exprimer sous forme analytique la loi vraie de tels phénomènes qui en rendrait possible la maîtrise et donc la prévision à long terme. Le point de vue déterministe est ici radicalement insuffisant et doit nécessairement être complété par un point de vue probabiliste prenant en compte l'aspect aléatoire irréductible des phénomènes. Ainsi un modèle de calcul décrivant la formation d'une crue consécutive à une averse sera défini à partir des résultats d'une analyse expérimentale des facteurs conditionnels de ce phénomène, quant au choix des variables et des paramètres à introduire dans le modèle et à la détermination de la forme de fonctions de transformation de la pluie en débit, mais "l'aléatoire" devra être introduit dans ce modèle : il tient compte en effet de l'action de tous les facteurs qui ont été négligés. On peut donc dire qu'en Hydrologie les méthodes statistiques interviendront à chaque instant dans des problèmes de définition de modèles représentatifs des phénomènes hydrologiques et adaptés aux objectifs recherchés d'une part, et d'autre part dans les questions d'ajustement de ces modèles à un donné expérimental et d'estimation de leurs paramètres.

Quelques remarques d'ordre général sur le "bon usage" des méthodes statistiques en hydrologie s'imposent ici car l'expérience montre que parfois le démon du calcul et le culte de la formule l'emportent sur le raisonnement et conduisent à des interprétations erronées des résultats qui jettent le discrédit sur des techniques parfaitement valables quand elles sont employées à bon escient.

- Le premier point est que la statistique mathématique est un outil au service de l'hydrologue et que sa mise en oeuvre ne peut, en aucun cas, suppléer à un manque ou à une insuffisance de données d'observation. Ses techniques ne permettent pas de "faire sortir le plus du moins". On ne doit pas s'attendre à ce que le calcul révèle autre chose

que l'information déjà inscrite en puissance dans l'échantillon d'observations dont on dispose. Par exemple il est parfaitement illusoire d'ajuster une loi de distribution à plus de 2 paramètres sur un échantillon de quelques dizaines de valeurs, en vue de l'estimation de quantiles de faible ou forte probabilité : ce que l'on croit gagner en souplesse de la loi, on le perd en précision d'estimation des paramètres d'ajustement.

- L'emploi des méthodes statistiques est subordonné à de strictes conditions d'application et l'interprétation correcte des résultats dépend de la vérification du respect de ces conditions. Le calcul n'est pas ici une fin en soi et un résultat chiffré peut-être parfaitement dépourvu de signification.

- Enfin l'application des méthodes statistiques à l'Hydrologie n'est pas académique : elle tend à fournir des éléments de décision, c'est-à-dire qu'elle conditionne des choix qui prennent appui sur le résultat du calcul mais le dépassent. C'est dans ce sens que la mise en oeuvre de ces méthodes est dite "opérationnelle".

Ces remarques trouveront leur illustration dans le cours de cet exposé à propos de la prédétermination des crues, problème majeur de l'Hydrologie dont on ne saurait, en quelques pages, donner une méthodologie définitive. Nous nous bornerons ici à des réflexions sur quelques unes des méthodes statistiques utilisées ou proposées pour traiter les problèmes de la crue "maximum" et de la prévision proprement dite des débits de crues.

I - LES PROBLEMES DE PREVISION HYDROLOGIQUE

La prévision d'un phénomène hydrologique peut être envisagée sous deux aspects :

1/ Le plus souvent, la prévision est entendue au sens large en hydrologie statistique : il s'agit de déterminer l'importance d'un événement de faible probabilité d'occurrence indépendamment de ses dates de réalisation à venir. C'est le problème de la crue "maximum" familier à tous les projeteurs qui s'interrogent sur l'importance de la crue à prendre en compte pour fixer les dimensions des organes de protection d'ouvrages en rivière. Une littérature extrêmement abondante concerne cette question qui, du point de vue des méthodes statistiques à mettre en oeuvre, est assez classique (estimation d'un quantile d'une loi de distribution). Les difficultés se situent au niveau des principes : dans quelles conditions peut-on raisonnablement extrapoler la validité d'une distribution de probabilités - fondée dans la zone des valeurs fréquemment observées de la variable aléatoire - dans la zone de valeurs extrêmes où l'on ne dispose de peu ou pas d'observations, auxquelles on ne sait guère attribuer une probabilité expérimentale et dont on ne peut toujours juger objectivement l'appartenance à la même population que l'échantillon des valeurs centrales de la distribution? Il est inutile d'insister sur les incidences économiques de telles prévisions statistiques - il faudrait soulever à ce propos la question des coefficients de sécurité - qui ont été analysées sous le nom de "problème du désastre" par M. MASSE.

2/ Au sens propre du terme, une prévision doit fixer à l'avance -

et à la plus longue échéance possible - la date d'occurrence et l'importance quantitative du phénomène attendu en un point ou sur une zone donnée : crue, étiage, précipitation, etc... Une telle prévision suppose la définition d'un modèle de calcul, dérivant d'une relation causale entre l'évènement et ses principaux facteurs conditionnels, adapté aux objectifs recherchés (annonce des crues, prévision d'apports dans les réservoirs) et dans lequel on doit nécessairement introduire un élément probabiliste pour prendre en compte l'écart irréductible entre le modèle et la réalité. En fait le résultat d'une prévision se présente sous la forme d'estimation d'une valeur moyenne, valeur la plus probable du phénomène correspondant à un système donné de valeurs des facteurs conditionnels contrôlés : le modèle probabiliste de calcul revêt la forme d'une loi de probabilité conditionnelle du phénomène permettant de calculer le degré de confiance que l'on peut accorder à la prévision ainsi réalisée. En effet sur le plan pratique, l'émission d'une prévision doit se traduire par des décisions, des choix (on retrouve ici le caractère "opérationnel" de la prévision) qui ne souffrent pas l'attente de la réalisation de l'évènement pour apprécier l'écart entre prédiction et réalité et par conséquent la confiance à accorder au calcul. Autrement dit de façon imagée selon le mot d'un hydrologue "la prévision est un plat qui se consomme frais" et doit être formulée en assortissant les valeurs estimées d'un intervalle de confiance qui en rende possible l'utilisation immédiate avec un risque calculé.

II - LE PROBLEME DE LA CRUE MAXIMUM

Rappelons d'abord quelques caractéristiques particulières du débit d'un cours d'eau considéré en tant que variable aléatoire :

- Le débit d'une rivière en un point de son cours à un instant donné t constitue une représentation de l'état du bassin versant en évolution aléatoire dans le temps : la suite continue des débits durant un intervalle de temps (t_1 , t_2) se présente comme un processus stochastique.

- Les méthodes d'étude des processus stochastiques ont fait au cours des années récentes de grands progrès mais à notre connaissance ces méthodes n'ont peu ou pas reçu d'application en hydrologie où l'on considère généralement les valeurs des débits comme des valeurs d'une variable aléatoire discrète. Toutefois, il faut noter que l'occurrence d'une de ces valeurs à une certaine époque ne peut pas toujours être ramenée à un simple tirage au sort dans une urne de composition donnée. En effet si la pièce de monnaie n'a, selon le mot de Joseph Bertrand, "ni conscience, ni mémoire", un cours d'eau - à défaut de conscience (bien que l'on personnalise volontiers les fleuves) - possède une certaine "mémoire", ou, plus prosaïquement, une inertie qui fait que le débit à l'instant t est lié en partie par les états antérieurs du bassin versant. Cette dépendance peut porter sur des périodes de quelques jours à quelques semaines pour les débits de crue (dans le cas des étiages, elle peut s'étendre à plusieurs mois voire d'une année à l'autre) : c'est ce phénomène qui interdit d'interpréter en courbe de probabilité la courbe des débits classés. On tourne ici cette difficulté en étudiant la distribution des maxima de crue annuels, c'est-à-dire la crue dont le débit maximal est la plus grande valeur atteinte dans l'année ; en définissant ce maximum sur l'année hydrologique (commençant à la fin de la période d'étiage, au moment où les réserves du bassin sont minimales), il y a peu de chance que les maxima de 2 années successives présentent une dépendance significative.

- Le dernier point à examiner, à propos du problème qui nous occupe, concerne le caractère stationnaire de l'hydrologie du bassin considéré et des séries chronologiques de débits qui la représentent. Des échantillons de la variable aléatoire "débit maximum de crue annuel" prélevés sur deux périodes différentes doivent avoir la même fonction de répartition. On l'admet généralement mais ce caractère stationnaire peut être perturbé à la longue par une évolution des bassins créant, dans certains cas, une tendance à l'accroissement des crues en importance (imperméabilisation des zones urbaines ou industrielles, déboisement).

Ces remarques posées, l'étude des lois de probabilité des débits maxima annuels a suscité de nombreux travaux concernant notamment l'utilisation des lois des valeurs extrêmes ou d'autres types de lois sans que les justifications de choix d'une loi particulière ne puissent être autrement qu'empiriques. MM. BERNIER et VERON doivent d'ailleurs présenter au cours de cette session une communication précisant l'incidence des divers types d'erreurs (notamment erreurs d'échantillonnage) sur la prévision statistique des crues et indiquant le moyen de calculer des intervalles de confiance associés aux estimations de quantiles d'une loi de probabilité. Nous donnerons brièvement ici quelques indications sur deux méthodes permettant des approches assez nouvelles du problème de la crue maximum. La première est une simple modification des procédés classiques pour rendre possible l'estimation de la crue maximale en un point où l'on ne dispose que d'une information insuffisante pour une étude statistique directe des débits alors que l'on possède des données importantes sur les précipitations génératrices de crues. La seconde est une analyse statistique dérivée des méthodes préconisées par E. HALPHEN pour l'étude de structure fine d'une suite de débits et d'où l'on peut déduire également des estimations de débits de crues correspondant à diverses probabilités de dépassement.

A. Estimation de la Crue Maximum à partir des précipitations

La méthode d'estimation de la Crue Maximum basée uniquement sur une série d'observations de débits maxima annuels est critiquable à certains égards. Malgré les précautions prises, deux débits maxima de même valeur peuvent avoir des probabilités d'occurrence différentes si les phénomènes qui les engendrent diffèrent : il importe d'étudier la genèse des crues de façon plus complète. De plus, la méthode n'utilise pas toute l'information disponible : l'utilisation des observations de précipitations génératrices de crues pourrait permettre de resserrer les fourchettes d'estimation obtenues et rendre possible cette estimation de la crue maximum dans les cas très fréquents où l'on ne dispose pas au point considéré d'une série suffisante de débits observés.

On part d'un modèle de transformation pluie-débit, par exemple un opérateur linéaire du type :

$$Q(t) = Q_0 + \int_0^t C(\tau) I(\tau) K(t - \tau) d\tau$$

où $Q(t)$ représente le débit observé à l'instant t , Q_0 le débit de base caractéristique de l'état du bassin au début de la pluie, $I(\tau)$ l'intensité de la pluie à l'instant τ , $C(\tau)$ un coefficient d'écoulement représentant l'abattement à faire subir à la pluie pour tenir compte de ce qui est perdu pour l'écoulement et $K(t)$ une fonction d'écoulement qui caractérise la redistribution dans le temps par le bassin d'un volume pluvial unité.

Un tel modèle ne rend compte que très schématiquement de la réa-

lité mais, si l'on estime avec soin les fonctions $K(t)$ et $C(t)$ à partir de quelques hydrogrammes de crues observés, il peut donner des résultats pratiques utiles : il permet de calculer la loi de probabilité du débit maximum Q à partir de la loi de probabilité des précipitations P génératrices de crues. On considère la fonction $K(t)$ caractéristique du bassin comme une fonction certaine pour une durée d'averse donnée. Les lois de probabilité des précipitations sont relativement bien connues, de même que celle de leur répartition dans le temps. Si l'on peut connaître la loi de probabilité des coefficients d'écoulement $C(t)$ et en négligeant les aléas du débit de base Q_0 , on peut par un calcul analytique en déduire la loi de probabilité du débit moyennant quelques hypothèses (notamment celle-ci : la loi de probabilité de la crue Q_t apparaissant à l'instant t ne dépend pas des niveaux atteints par les crues précédentes mais seulement de l'intervalle de temps θ écoulé depuis l'apparition de la dernière crue $Q_{t-\theta}$). La partie délicate concerne la loi du coefficient d'écoulement dont on ne dispose généralement que d'un échantillon de valeurs assez réduit. On peut admettre qu'elle dépend de l'intervalle de temps θ écoulé depuis la dernière crue (indicateur de la saturation du sol) et l'on supposera que C varie par valeurs discrètes dont on établira les probabilités pour diverses valeurs de θ .

Des applications de cette méthode ont été faites à l'étude des crues de la Seine et de la Marne qui ont permis de recouper les ordres de grandeur des estimations de crues maximales obtenues à partir de l'étude directe des débits. Ce résultat est d'autant plus intéressant que les schémas de relations pluie-débit utilisés avaient dû être simplifiés pour permettre de conduire le calcul à son terme.

B. Estimation de la crue maximum à partir de l'analyse de la structure fine des suites de débits à l'échelle mensuelle

Pour permettre une meilleure compréhension des faits hydrologiques et notamment pour tenir compte de ce que des crues de même importance d'un cours d'eau peuvent correspondre à des situations météorologiques très différentes, qu'elles ont des "structures" différentes et que par conséquent il semble déraisonnable de leur attribuer la même probabilité d'occurrence, E. HALPHEN a eu l'idée d'étudier les suites de débits sur une période assez longue (de l'ordre du mois) afin d'en dégager des "structures" auxquelles rattacher les crues - phénomènes aléatoires - qui peuvent survenir au cours de cette période.

La méthode consiste à représenter les diverses "trajectoires" observées du processus aléatoire que constitue la suite des débits relatifs à la période considérée (mois) par des séries de Fourier dont le développement est généralement limité aux 3 premiers harmoniques. Au cours d'un mois un certain nombre de caractéristiques hydrométéorologiques d'un bassin restent suffisamment stables ou évoluent suffisamment lentement pour qu'il en résulte dans la série chronologique des débits l'apparition d'une "tendance" autour de laquelle se répartissent des variations quotidiennes par exemple. On peut donc analyser un débit $Q(t)$, ou plus exactement son logarithme (dans ce paragraphe $Q(t)$ représente le débit journalier logarithmique), en deux composantes : $X(t)$ tendance du

 *ou plus exactement son logarithme (dans ce paragraphe $Q(t)$ représente le débit journalier logarithmique),

mois considéré et $Z(t)$ variations quotidiennes autour de cette tendance. C'est la composante $X(t)$ que l'on représente par un développement de Fourier ajusté sur la suite des débits de chaque mois de Janvier, s'il s'agit de l'étude de ce mois. Les coefficients de ce développement sont aléatoires et E. HALPHEN a pu montrer que les écarts $Z(t)$ entre la courbe expérimentale de la courbe de Fourier sont distribués à peu près au hasard suivant une loi normale : ce qui permet de traiter séparément l'étude statistique des courbes de Fourier et celle des écarts Z et de tirer des conclusions valables touchant leur conjonction.

Les éléments aléatoires qui entrent en jeu dans cette analyse sont :

- d'une part les caractéristiques m et ω de la tendance $X(t)$, m étant la moyenne de $X(t)$ pour le mois donné et ω l'amplitude quadratique

$$m = X(t) \quad \omega = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=3} a_n^2 + b_n^2} \quad \text{si } X(t) = \sum_{n=0}^{n=3} (a_n \cos n \varphi_t + b_n \sin n \varphi_t)$$

- d'autre part l'écart $Z(t)$ dont la répartition est supposée normale et de moyenne nulle : il est caractérisé par son écart-type σ .

Pour chacun des éléments m et ω , on a pour le mois considéré autant de valeurs que d'années pour lesquelles on dispose de relevés de débit et l'on peut ajuster des lois de probabilités. Ces divers éléments ne sont pas dépourvus d'une certaine signification physique et l'on peut ainsi profiter de l'information disponible sur des cours d'eau de régime semblable pour en préciser les évaluations. Cette circonstance favorable permet souvent d'obtenir des estimations suffisamment précises à partir d'un nombre d'années d'observations assez réduit.

Le débit logarithmique de la crue peut ainsi être décomposé en 3 éléments :

$$Q = m + \delta + \tau \sigma$$

- δ qui s'interprète comme l'excédent sur m du maximum de la courbe de Fourier est lié à l'amplitude quadratique moyenne ω

- τ est la variable normale centrée réduite.

L'indépendance en probabilité des variables m , δ et τ , qui peut être admise valablement, permet une estimation du débit logarithmique de la crue correspondant à une probabilité d'occurrence : $p = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3$ si p_1 , p_2 , p_3 sont les probabilités respectives des valeurs m , δ et τ que l'on peut se fixer à partir de leurs lois de probabilités.

Les diverses combinaisons de valeurs des éléments m , δ et τ correspondent aux "structures" de crues évoquées plus haut et il apparaît clairement qu'à deux types de situations peuvent correspondre deux systèmes de valeurs m , δ , τ et m' , δ' , τ' telles que :

$$m_{p_1} + \delta_{p_2} + \tau_{p_3} \sigma = m'_{p'_1} + \delta'_{p'_2} + \tau_{p'_3} \sigma$$

(donc des évaluations de débit égales) sans que les probabilités, $P = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3$ et $P' = p'_1 \cdot p'_2 \cdot p'_3$ soient forcément égales.

On n'entrera pas ici dans les modalités pratiques du calcul des séries de Fourier appliquées aux débits. Il semble que cette méthode n'ait

guère fait l'objet d'applications systématiques, on peut le regretter car elle constitue une voie d'approche d'une évaluation plus précise, parce que plus fondée dans les faits, des probabilités d'occurrence des crues.

Pour être complet il faudrait, en conclusion de ces notes sur l'application des méthodes statistiques au problème de la crue maximum, indiquer comment les résultats d'hydrologie statistique entrent dans le calcul économique des ouvrages de protection. Nous ferons ici la remarque suivante : les évaluations des coûts des dommages, étant toujours entachés d'une grande incertitude, rendent difficile les calculs d'optimum économique et il peut être illusoire de représenter les phénomènes hydrologiques par des modèles mathématiques trop complexes, eu égard à l'information expérimentale dont on dispose. Mais la rigueur du raisonnement dans l'utilisation des méthodes statistiques ne doit pas se relâcher pour autant car elle permet de mesurer l'incidence, sur les décisions à prendre, des marges d'incertitude concernant les éléments d'information dont on est parti, et c'est bien là l'essentiel.

III - LE PROBLEME DE LA PREVISION DES CRUES

Dans le domaine de la prévision hydrologique proprement dite, d'importants travaux ont été menés à bien, notamment par le Service Hydro-météorologique de la Division Technique Générale d'E.D.F. où ont été systématiquement étudiés les liens de corrélation entre les apports à prévoir dans les réservoirs à diverses échéances de temps et une combinaison de données (précipitations, stock neigeux, température) susceptibles de représenter l'état du bassin et de ses réserves connues au moment de la prévision. Les prévisions émises sont assorties de fourchettes de probabilité déduites de l'étude de la dispersion conditionnelle des débits en fonction des facteurs contrôlés. Les modèles probabilistes sont naturellement plus efficaces dans le cas de systèmes hydrologiques présentant une forte inertie que pour les bassins de montagne à régime pluvial, où les prévisions de débit sont nécessairement limitées dans leur échéance par l'absence de prévision de précipitation et par la rapidité de formation et d'évolution des ondes de crues, c'est-à-dire en définitive, par une grande dispersion des "trajectoires" du processus aléatoire constitué par les débits.

Il est donc nécessaire sur de tels bassins - à faible inertie hydrologique - d'envisager une prévision des crues permettant de définir les caractéristiques de l'hydrogramme de crue à une échelle de temps assez fine (la journée, voire même quelques heures). Or la plupart des tentatives effectuées dans ce sens ont consisté à rechercher empiriquement des fonctions de réduction de la pluie en écoulement et des fonctions d'étalement qui rendent compte de l'action du bassin versant pour la redistribution des volumes d'écoulement. Un point de vue déterministe a prévalu dans ces recherches et a, dans certains cas, abouti à des résultats très encourageants quant à la possibilité de solution de ce problème. Toutefois, et c'est là le point faible de ces méthodes, elles fournissent seulement un pronostic sans que l'on puisse lui associer un degré de confiance. C'est à ce propos que nous voudrions donner quelques indications sommaires sur la possibilité et la nécessité d'intervention de la Statistique Mathématique dès le stade de l'estimation des fonctions de transformation de la pluie en débit.

On admettra sans peine que tous ces modèles de transformation qui - par rapport à la nature des phénomènes en cause - sont plutôt de caractère synthétique, ne sauraient être que des schématisations grossières du processus de passage de la pluie en débit. Il sera donc nécessaire de tenir compte de cette distance entre modèle et réalité dans l'ajustement des paramètres des fonctions de transfert aux observations de débits et de précipitations dont on dispose. Le problème fondamental est donc encore ici un problème d'estimation dont l'analyse se ramène à celle des 2 types d'erreurs classiques en Hydrologie statistique : les erreurs d'adéquation et les erreurs d'échantillonnage.

A. Les erreurs d'adéquation

Ces erreurs sont la conséquence de l'écart entre le modèle et la réalité (crue calculée et observée) et peuvent être représentées dans un cadre probabiliste par des écarts aléatoires autour des modèles de transformation qui ne fournissent que des "valeurs moyennes" : il s'agira donc d'introduire et de spécifier la loi de probabilité de ces écarts.

Par exemple :

- les caractéristiques d'un hydrogramme type d'écoulement d'un bassin (débit de pointe, temps de concentration, temps de montée) peuvent être des variables aléatoires pour tenir compte des facteurs non contrôlés.

- des fonctions de transformation définies empiriquement peuvent être représentées par des processus aléatoires pour corriger l'effet de "moyenne" de ces modèles trop rigides.

Ces principes semblent devoir être appliqués dès le stade préliminaire de la détermination de la pluie moyenne $P(t)$ sur le bassin. Cette notion de "pluie moyenne" n'est en fait qu'une abstraction commode. Les précipitations génératrices des crues sont distribuées dans le temps certes mais aussi dans l'espace ; les représenter par une mesure ponctuelle, seule fonction du temps, constitue déjà une schématisation assez poussée. La façon dont est ensuite déterminée la moyenne spatiale en constitue une autre. C'est peut-être pour la représentation de la pluie moyenne $P(t)$ que les erreurs d'adéquation sont les plus importantes. Il importerait donc d'en aborder l'étude dans un cadre probabiliste en partant d'un modèle théorique de distribution spatial des précipitations et en analysant les écarts à une représentation ponctuelle de ces précipitations.

B. Les erreurs d'échantillonnage

Les erreurs d'échantillonnage n'interviennent que si la détermination des fonctions de transfert et l'estimation de la pluie moyenne sont placées a priori dans un cadre probabiliste. En effet si les modèles utilisés sont considérés comme "certains" ou invariants d'une crue à l'autre, il ne saurait être question d'erreurs d'échantillonnage : ce sont les erreurs d'adéquation qui engendrent l'incertitude concernant l'estimation des fonctions de transfert sur un échantillon limité d'observations. Le problème de l'information contenue dans une crue (par exemple le nombre d'observations nécessaire pour avoir une confiance suffisante dans les fonctions estimées) ne peut-être abordé que dans le cadre des schémas probabilistes précédemment décrits.

C. Les méthodes pratiques d'estimation

Pour que ces principes puissent être transposés sur le plan pratique, il importe de spécifier les modèles de transfert sous une forme mathématique. Les formules mathématiques peuvent paraître beaucoup trop rigides en comparaison des méthodes empiriques utilisées actuellement. On constate cependant que certaines fonctions empiriques de réduction et d'étalement pourraient être représentées par des formules assez simples. La méthode de l'Hydrogramme Synthétique de M. LARRIEU est d'ailleurs un exemple de la souplesse présentée par des formules mathématiques simples.

Le modèle de transfert peut alors être représenté par un certain nombre de paramètres laissés indéterminés a priori et que l'on estimera ensuite. Un procédé possible d'estimation pourrait être basé sur les remarques suivantes :

- on sélectionne a priori quelques caractéristiques importantes des hydrogrammes de crues par exemple : volume écoulé, débit de pointe, temps de montée, etc..

- les valeurs observées de ces caractéristiques sont égalées aux valeurs théoriques correspondantes (espérances mathématiques) déduites des relations choisies et qui sont ainsi fonction de paramètres indéterminés.

- On résoud par rapport à ces paramètres et l'on "moyenne" pour l'ensemble des crues analysées.

Ce procédé se rapproche de la méthode des moments utilisée pour l'ajustement des lois de probabilité.

Dans certains cas (par exemple pour la méthode de M. LACROIX pour le calcul des Hydrogrammes à partir de la pluie), les calculs analytiques seront assez complexes, mais ces difficultés pourraient être tournées par l'utilisation d'un calculateur électronique. Une fois l'estimation des paramètres effectués, les erreurs d'échantillonnage pourraient être déterminées par la méthode de Monte-Carlo : tirages au sort dans les lois de probabilité ainsi spécifiées et reconstitution des crues par calculateur.

En matière de conclusion à cet exposé, il apparaît que l'Hydrologie Statistique a encore de beaux jours en perspective : ses méthodes se sont affermies et l'on dispose maintenant d'outils bien adaptés dont on peut simplement regretter le petit nombre d'utilisateurs en face de la tâche énorme que représente l'organisation d'une gestion rationnelle des ressources en eau.

QUELQUES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

J. BERNIER - Portée et limites des méthodes de prévision statistique des crues utilisées dans le calcul économique des ouvrages de protection contre les crues. C. R. E. C. Chatou, Rapport HYD - 63 n° 21 - 17.9.63

- J. BERNIER et R. VERON - Sur quelques difficultés rencontrées dans l'estimation d'un débit de crue de probabilité donnée. Communication présentée à la Session n° 74 du Comité Technique de la S.H.F.- 21 - 22 Novembre 1963
- S. FERRY - L'utilisation des méthodes statistiques à l'Electricité de France pour la prévision des apports dans les réservoirs. Revue de Statistique Appliquée, Vol. IV, n° 2, 1956
- P. GUILLOT - La probabilité du débit maximum annuel et ses relations avec la loi de distribution des débits journaliers. Congrès de l'A.I.R.H. - Londres 1963 - Section III, Communication 15
- E. HALPHEN - Une méthode d'analyse statistique des débits. A.I.H.S. - Assemblée Générale de Rome - 1954 - Tome III
- Z. KACZMAREK - Forecasting Random phenomena in Hydrology
- J.L. LACROIX - Essai de calcul des hydrogrammes à partir des pluies : Cas de la Corrèze à Brive. Mémoires et Travaux de la S.H.F. - n° II - 1961
- J. LARRIEU - Méthodes d'analyse de la structure fine des débits. Revue de Statistique Appliquée 1956 - IV n° 2
- J. LARRIEU - Evaluation des crues catastrophiques par la méthode des hydrogrammes synthétiques. A.I.H.S. TORONTO 1957 - Tome III
- G. MORLAT - L'emploi des méthodes statistiques en Hydrologie. Bulletin de l'Institut Agronomique et des Stations de Recherches de Gembloux - I - 1960

DISCUSSION

(Président : M. MORLAT)

M. LE PRESIDENT remercie M. JACQUET du tableau qu'il vient de donner de l'ensemble des méthodes applicables au problème de la détermination des débits de crue et, en particulier, de ce qu'on peut attendre des méthodes statistiques dans ce problème. M. JACQUET a souligné avec raison le caractère de la confrontation que l'on peut faire entre la richesse de ces méthodes et le déplorable petit nombre des applications qui ont pu être poussées jusqu'à leur terme : c'est qu'en effet, il y a dans ces problèmes un contraste considérable entre les travaux théoriques, qui demandent surtout de l'imagination et de la rigueur et la longueur énorme des calculs pratiques dès que l'on veut passer à une application complète des méthodes que M. JACQUET a esquissées au début.

M. LE PRESIDENT évoque, à ce sujet, les vers de Boileau que M. Pierre MASSE avait cités dans son article "Situation, perspectives et applications de l'Hydrologie Statistique" (1) : (l'Hydrologie statistique) "aux travaux ennuyeux et faciles est une oeuvre de choix qui veut beaucoup d'amour".

M. RODIER fait une importante intervention dans les termes ci-après :

"Les exemples pratiques d'application intégrale des méthodes présentées par M. JACQUET sont très rares car dans le cas d'applications pratiques on donne à l'hydrologue des crédits et un délai limité pour exécuter ce travail, ce qui oblige à simplifier très largement. L'hydrogramme synthétique de Larrieu a déjà été utilisé, nous l'avons par exemple construit pour la détermination de la crue exceptionnelle dans un projet de barrage sur le Rio Negro (Paraguay).

 (1) Annuaire Hydrologique de la France 1940 (S.H.F. Paris)

"Il est courant que nous employions l'hydrogramme unitaire pour des buts pratiques. Comme on l'a souligné, la transformation volume de pluie en volume de crue est essentielle. Ceci suppose qu'on tienne compte des 4 caractéristiques de l'averse : sa hauteur, son intensité (ou la forme du hyétogramme), sa répartition dans le temps et l'état d'humidité du sol au début de la pluie. Pour la hauteur c'est assez facile, on peut faire une détermination statistique correcte. Pour la répartition dans le temps c'est moins facile mais on arrive à des solutions approchées. Pour la forme du hyétogramme nous n'avons rien trouvé, en particulier nous ne savons pas comment traduire en un index simple les averses doubles avec ou sans pluie dans l'intervalle telles qu'on les rencontre souvent dans les régions tempérées. Quant à l'humidité du sol elle nous semble absolument essentielle. M. JACQUET a signalé qu'il se rapportait à la crue précédente ce qui suppose un bassin de forte inertie ; or, pour les petits bassins cela ne suffit plus, il faut se rapporter à un index du genre de celui de KOHLER (Antecedent precipitation index) tel que $I_h = \sum \frac{P_i}{(t_i)^n}$ (souvent on prend $n = 1$ pour simplifier). Depuis 3 ans nous utilisons cet index qui souvent a donné de bons résultats.

M. ROCHE estime que la difficulté inhérente à l'estimation de la crue exceptionnelle réside dans la définition de la probabilité du hyétogramme pris comme base, en fonction des éléments qui le composent, valeur de la précipitation exceptionnelle dans son ensemble et modulation de cette valeur dans le temps. Cette définition fait toujours appel à des procédés d'aspect "culinaire" car il n'en existe pas d'autre. La "réponse du bassin" est, à son avis, moins importante que cette définition du hyétogramme.

En ce qui concerne le réglage du modèle mathématique, M. ROCHE indique qu'on est souvent conduit à utiliser des éléments d'information précaires. En effet, les données antérieures sur les crues sont plus ou moins nombreuses et, quelquefois même, inexistantes ou réduites à des descriptions qualitatives d'averses. Ces informations permettent, lorsqu'elles sont recueillies peu de temps après la crue, d'avoir une idée de la pente, de repérer l'intensité maximale de l'averse et de la calculer approximativement : le hyétogramme ainsi construit et complété par quelques données constitue la base du modèle mathématique, que l'on modifie de proche en proche de façon à obtenir un hydrogramme dont l'allure se rapprochera plus ou moins de ce que les témoins ont observé à l'exutoire. C'est dire qu'à cette échelle de précision, les considérations sur la forme de l'hydrogramme et sur le coefficient de ruissellement n'ont plus beaucoup d'importance. Mais ce n'est pas un cas général et l'on ne saurait en déduire qu'il faut s'en tenir à ces données plus que sommaires.

M. JACQUET est d'accord avec M. ROCHE et remarque que l'on ne peut concevoir la notion de probabilité ni pour un hyétogramme ni pour un hydrogramme de crue pris dans son ensemble, mais qu'il suffit, en général de connaître la probabilité de certains éléments, tels que intensité maximale de pluie ou débit de pointe de crue, temps de montée ou volume d'écoulement, etc...

M. ROCHE souligne, toutefois, la nécessité de combiner ces éléments pour avoir un hyétogramme d'une certaine durée lorsqu'il s'agit d'un bassin d'une certaine importance et c'est là qu'on est extrêmement gêné.

M. FERRY redit, au risque de se répéter, sa défiance à l'égard des analyses trop fines de liaison entre pluie et débit, car la réalité est beaucoup trop complexe et l'on n'a jamais assez de données pour procéder à de telles analyses. Il conviendrait d'abord, selon lui, de caractériser les précipitations sur un bassin par une distribution à deux paramètres : volume d'averse et durée d'averse. D'autre part, le volume et la durée d'une averse étant donnée, il faudrait chercher la loi de probabilité du volume écoulé dans un temps donné, égal à la durée de l'averse augmentée d'une constante. La connaissance du volume écoulé par une crue en un temps donné est bien suffisante, en pratique, pour en déduire une valeur approchée du débit de pointe. Des formes d'hydrogrammes vraisemblables quelconques conduisent finalement pour cette valeur de pointe à des écarts inférieurs à la précision que l'on peut prétendre atteindre.

M. RODIER estime que la forme de l'hydrogramme a tout de même son importance et s'établit, d'ailleurs, sans difficulté. La détermination du volume de crue en fonction du volume de pluie est l'opération la plus difficile, et M. FERRY a raison de le souligner : en plus des paramètres volume et durée de l'averse, cette opération nécessite la connaissance de l'état antérieur d'humidité du sol, que l'on introduit sous la forme des index de KOHLER, définis plus haut, et qui, dans le cas des petits bassins, donnent une information meilleure que la connaissance du dernier débit.

M. ROCHE serait assez d'accord avec M. FERRY s'il s'agissait d'averses unitaires ; mais dans le cas très fréquent de crues provoquées par des averses complexes, la fonction de transformation n'est plus celle d'un simple hydrogramme unitaire, mais comprend toute une série de calculs qui intéressent un ensemble de surfaces isochrones et dans lesquels la distribution prend une grande importance. On peut, pour une même averse, arriver à faire varier le débit de pointe du simple au double.

M. FERRY remarque que la possibilité d'un tel écart lui paraît peu vraisemblable, car il correspondrait à la différence des hauteurs d'un rectangle et d'un triangle de même surface, c'est-à-dire à des formes limites extrêmes ; en adoptant une forme raisonnable, directement inspirée de l'expérience sans autre analyse, il lui paraît difficile d'introduire ainsi des erreurs de plus de 20 %, 25 %, ce qui peut-être considéré comme satisfaisant en une telle matière ; l'hydrogramme, plus ou moins péniblement calculé par sommation d'hydrogrammes unitaires, ne donnant d'ailleurs pas à son avis de garantie sérieuse d'une représentation sensiblement plus fidèle de la réalité.

Mais M. RODIER et M. ROCHE pensent qu'on peut arriver à faire mieux dans les études hydrologiques et qu'ils y sont, d'ailleurs, arrivés dans de nombreux cas. Par le procédé indiqué par M. FERRY, on trouve des résultats entachés d'une imprécision de plus de 100 % pour les crues décennales ; or, depuis une douzaine d'années, MM. RODIER et ROCHE ont calculé, sur les bassins expérimentaux, plusieurs dizaines de crues décennales et ils pensent qu'ils auraient déjà subi d'amers reproches si l'imprécision avait été de cet ordre.

M. QUESNEL signale qu'en dehors du volume des précipitations pluviales, de leur durée, de l'état de saturation du sol au début des précipitations, il existe un quatrième facteur dont, sur certains cours d'eau, l'action est fort loin d'être négligeable ou exceptionnelle : c'est l'apport de débit, soit direct par écoulement dans l'émissaire du bassin, soit indirect par les exurgences de l'écoulement hypodermique, inhérent à une crue ayant précédé d'un court délai la crue étudiée.

Les tableaux ci-après illustreront son observation :

I. - La Durance - Station de pont Mirabeau - B.V. 11 917 Km

Années	Mois	Jour	Mesure de la pointe de l'onde de crue	Débit maximum estimé en m ³ /s
1868	Octobre	2	21 H.	2 900
"	"	4	18 H.	3 240
1872	"	15	3 H.	2 400
"	"	18	7 H.	3 550
"	"	20	12 H.	3 950
"	"	23	5 H.	2 400
"	"	28	8 H.	2 670

(documentation obtenue du Service des P. & C. des Bouches-du-Rhône).

II. - Crues groupées de cours d'eau cévenols

19 Septembre et 3 Octobre 1900	27 Septembre 9 et 6 Octobre 1907	27 Septembre et 16 Octobre 1947
9 et 16 Octobre 1907	27 Septembre et 9 Octobre 1933	
27 Septembre et 9 Octobre 1933	30 Septembre et 4 Octobre 1958	
30 Septembre et 4 Octobre 1958		

(documentation tirée d'une note de M. DEYMIE, Ingénieur Général des Ponts et Chaussées).

L'étude de la probabilité de tels groupements de crue présenterait, croit M. QUESNEL, un indéniable intérêt à tous égards.

M. ROCHE pense que, dans ce cas, ce n'est pas le problème de l'hydrogramme lui-même, mais l'étude statistique de la pluie qui doit être considérée, non plus limitée à une averse, mais étendue aux ensembles d'épisodes pluvieux. La difficulté évoquée tout à l'heure au sujet de la détermination d'un hydrogramme devient évidemment beaucoup plus grave dans le cas d'un épisode pluvieux qui porte sur un nombre de jours assez considérables.

M. BONNIN rappelle que des valeurs de coefficients de ruissellement ont été fournies dans une communication très documentée de M. PARDE, présentée aux IIIèmes Journées de l'Hydraulique à Alger en 1954.

M. LE PRESIDENT remercie M. JACQUET et les participants à la discussion, et retient de celle-ci que chaque ingénieur placé en face des problèmes de détermination des débits de crue - qu'il connaît bien lui-même - n'est pas frappé par les mêmes difficultés et que la tendance à penser que l'on peut retenir telle ou telle formule simple de la théorie est affaire de cas d'espèce. La conclusion générale à en tirer est que cela doit renforcer l'intérêt qu'il y a à considérer les modèles généraux que M. JACQUET a présentés, car ils recouvrent probablement les diverses espèces de difficultés, auxquelles il a été fait allusion au cours de la discussion et que c'est en les simplifiant draconiquement d'une manière ou d'une autre que l'on répondra au désir des diverses personnes qui sont intervenues. Cela montre donc à la fois la complexité du problème et l'intérêt de s'attacher aux études dont M. JACQUET a rendu compte au Comité Technique de la S.H.F.