NOTULES HYDRAULIQUES

A PROPOS DE LA MONOGRAPHIE DE N. A. KARTVÉLICHVILI " LA THÉORIE DES PROCESSUS PROBABILISTES DANS L'HYDROLOGIE ET DANS LE RÉGLAGE DE L'ÉCOULEMENT FLUVIAL "

PAR J. KÜTTNER *

Cette monographie de N. A. Kartvélichvili, savant soviétique connu, professeur, docteur ès sciences techniques, de l'Institut de recherches électroénergétiques de l'U.R.S.S. à Moscou, est destinée aux techniciens de l'hydrologie, de l'hydrotechnique, de l'hydroénergétique et aux mathématiciens qui sont intéressés par les problèmes hydrologiques.

A la différence de la littérature antérieure sur l'application de la théorie des probabilités au réglage de l'écoulement fluvial, dont les auteurs se référaient à la théorie des événements aléatoires, le professeur Kartvélichvili dans cette monographie entreprend une analyse systématique de l'écoulement fluvial et de son réglage par les réservoirs vus sous l'aspect de la théorie des processus aléatoires. Ce point de vue répond mieux à la nature physique du processus d'écoulement et assure par conséquent la solution la plus générale et la plus complète des problèmes de son réglage.

Les trois premiers chapitres du livre contiennent des données indispensables sur la théorie des probabilités, la statistique mathématique et la théorie des processus probabilistes, exposées sous l'aspect de leur application à l'hydrologie, et illustrées principalement par des exemples hydrologiques. Ce qui est nouveau dans ces chapitres, c'est que l'exposé pour la première fois dans la littérature hydrologique, et probablement dans la littérature appliquée en général, est composé strictement à partir des notions de l'algèbre des événements introduites par E. Borel et sur la base de l'axiomatique de A.N. Kolmogorov, présentées sous une

forme tout à fait accessible aux ingénieurs. Tout cela a permis de ne plus utiliser ni la définition classique ni la définition statistique de la probabilité, en usage dans les œuvres du caractère appliqué, qui ne sont pas logiquement parfaites.

Dans le quatrième chapitre, l'écoulement fluvial naturel est traité comme un processus probabiliste. Si l'on ne s'écarte pas de la distribution de l'écoulement annuel et si l'on tient compte des valeurs instantanées des débits l'écoulement fluvial dans les hypothèses suffisamment élargies on peut le considérer comme un processus probabiliste harmonisé, c'est-à-dire comme un processus commandé par les fonctions de la distribution des probabilités dépendant périodiquement du temps à la période d'une année. Puis l'on étudie les raisons probables du caractère asynchrone et cyclique de l'écoulement, c'est-à-dire du groupement des années sèches et des années de hautes eaux. Ici deux hypothèses aux limites sont possibles :

1° le processus d'écoulement, outre la composante périodique de la période annuelle qui reflète la variabilité saisonnière de l'écoulement, est composé aussi des autres composantes périodiques ou quasi-périodiques d'une grande période dues aux raisons cosmiques;

2° le processus d'écoulement ne contient pas de composantes de cette sorte, et son caractère cyclique est une manifestation d'une tendance bien connue de tous les processus aléatoires normaux à la formation des cycles. Dans cette monographie on cite une série de faits qui témoignent en faveur de la deuxième hypothèse mais on note en même temps que ces faits sont encore insuffisants pour que les

* Ingénieur - Licencié ès Sc. Techn., Helsinki (Finlande),

jugements soient catégoriques. Cependant, comme la théorie du réglage de l'écoulement est universelle et qu'elle n'est pas liée à l'une ou l'autre de ces deux hypothèses, l'acceptation de l'une d'elles ne peut se faire sentir que sur les résultats numériques d'application de la théorie mais pas sur les constructions méthodiques générales.

La construction des fonctions de la distribution des probabilités qui commandent le processus de l'écoulement est la question principale du quatrième chapitre. Cette construction est effectuée sur la base des suppositions suivantes :

1° le processus de l'écoulement est un processus markovien complexe. Le « maillonnage » de ce processus, c'est-à-dire le nombre des états antérieurs qui déterminent les probabilités des états futurs, est déterminé par les calculs de contrôle;

2° quand les $Q_1, \dots, Q_n$ sont les débits du fleuve en n moments du temps qui ont n'importe quelles distributions à une dimension, et les $\varphi_1(Q_1), \dots, \varphi_n(Q_n)$ sont les fonctions de ces débits distribués normalement, la distribution des probabilités du vecteur $\varphi_1, \dots, \varphi_n$ à n dimensions est normale elle aussi. La première hypothèse est naturelle et n'a pas besoin de commentaires, la deuxième hypothèse, celle du professeur Kartvélichvili, est acceptée comme plus générale que les deux hypothèses sur les distributions à plusieurs dimensions proposées jusqu'à nos jours. Il n'est pas du tout exclu que les recherches ultérieures donnent des hypothèses plus parfaites.

Dans le chapitre IV il est démontré aussi que, en partant des fonctions de la distribution des probabilités qui commandent le processus de l'écoulement comme un processus unique, les fonctions de la distribution des probabilités des débits caractéristiques (maximaux, moyens annuels, etc.) peuvent être obtenues par la voie purement mathématique. Le chapitre se termine par une analyse de la nature probabiliste des pronostics hydrologiques qui consiste en ce que tout pronostic n'est en somme que le passage d'une distribution absolue à une distribution conventionnelle ayant une dispersion plus petite qui, théoriquement parlant, peut tendre à zéro (dans ce cas le pronostic devient une prédiction univoque exacte). Cependant en pratique la dispersion de la distribution est au moins légèrement différente du zéro et le pronostic absolument exact est en principe impossible.

Le cinquième chapitre, assez court, traite des principes généraux du réglage de l'écoulement et des données de base pour les calculs à caractère auxiliaire.

Dans le chapitre VI on examine le réglage de l'écoulement au rendement donné, c'est-à-dire au rendement dont les règles sont établies d'avance. Le rendement peut être soumis au temps, au remplissage d'un réservoir donné ou à d'autres réservoirs, à quelques valeurs aléatoires comme la production de l'énergie dans les centrales hydro-électriques qui n'ont pas de réglage et fonctionnent au fil de l'eau, etc. Une limitation essentielle de ce chapitre est le fait que le débit rendu par un réservoir doit être présenté comme une fonction déterminée de certaines valeurs connues au moment où ce débit est rendu.

Le professeur Kartvélichvili commence par le cas le plus simple du réglage par un seul réservoir pendant plusieurs années à rendement constant, passe aux cas toujours plus complexes jusqu'au réglage saisonnier de l'écoulement par des séries de réservoirs en cascade pour démontrer que toute la théorie de réglage de cette sorte peut être entièrement construite sur la formule connue de la probabilité totale qui conduit aux équations intégrales (dans les cas plus complexes — aux systèmes des équations intégrales), qui déterminent les fonctions de la distribution des probabilités du remplissage des réservoirs aux moments voulus. Une fois ces fonctions trouvées il n'est pas difficile de déterminer l'approvisionnement du rendement défini par les règles adoptées qui est la caractéristique principale du processus de réglage. Il n'est plus difficile également de construire les autres caractéristiques du réglage exigées par la pratique pour la solution de l'un ou l'autre des problèmes concrets.

La solution analytique exacte des équations intégrales de la théorie du réglage de l'écoulement n'est possible que dans les cas particuliers les plus simples pour les séries très étroites de la distribution des probabilités du processus de l'écoulement. Ces cas ne présentent pas un intérêt particulier et ne sont pas traités dans la monographie. Pour la solution des équations intégrales, on propose les méthodes approximatives universelles; la monographie contient leur exposé bref.

Dans le même chapitre on met en évidence qu'il est impossible de déterminer la fonction de la distribution des probabilités du remplissage des réservoirs directement à partir des équations différentielles stochastiques du réglage de l'écoulement.

Dans le septième et dernier chapitre de la monographie, on étudie les problèmes d'optimisation du réglage de l'écoulement fluvial. Dans ces problèmes, contrairement aux problèmes du chapitre précédent, le rendement n'est pas fixé d'avance et la question est posée dans un plan différent : trouver un régime de réglage dans lequel l'attente mathématique d'une fonctionnelle obtient le minimum. Cette fonctionnelle a d'habitude les sens économiques : dans la plupart, ou « dominant » des cas, ce sont les dépenses destinées aux exigences des uns ou des autres utilisateurs de l'eau, consommateurs de l'énergie pour lesquels on effectue le réglage. En particulier, dans le cas du réglage énergétique de l'écoulement, le problème est d'effectuer un tel réglage de l'écoulement par les réservoirs de la centrale hydroélectrique qui puisse couvrir le diagramme de charge du réseau énergétique avec des dépenses minimales de combustible pour les centrales thermiques fonctionnant en parallèle avec la centrale hydroélectrique, pour une période de temps (saison, année, etc.). La solution du problème d'optimisation n'assure pas le régime, mais conduit aux règles déterminées du réglage sur la base de laquelle on peut définir l'approvisionnement du rendement par les méthodes exposées dans le chapitre précédent.

Les problèmes d'optimisation sont du point de vue analytique (mais non pas en ce qui concerne le calcul) plus simples que les problèmes du réglage au rendement donné. La monographie donne leur

solution en deux variantes : pour un modèle au temps continu, à la base du calcul des variations, et pour un modèle au temps discrétionnaire, à la base de la programmation dynamique.

Il y a longtemps déjà que la question de la description mathématique de l'écoulement fluvial et de la méthode des calculs de son réglage était posée aux spécialistes. Comme on le voit d'après la monographie du professeur Kartvélichvili cette question est maintenant résolue complètement par une large application de la théorie des processus stochastiques. La théorie des processus probabilistes élaborée par le professeur Kartvélichvili ouvre une voie, unique et bonne en principe, d'approche aux problèmes de l'hydrologie et du réglage de l'écoulement fluvial et donne une méthode générale et complète de leur solution.

Pour utiliser effectivement la théorie des processus probabilistes à la solution des problèmes pratiques il faut avoir des calculatrices numériques d'une classe élevée. Sinon, on ne peut pas réaliser simplement en pratique les méthodes qui découlent de la théorie des processus aléatoires. Pour cette raison, avant que les calculatrices numériques ne deviennent accessibles aux ingénieurs, la théorie des processus probabilistes pouvait avoir une valeur principalement théorique pour l'hydrologie et le réglage de l'écoulement, car on ne pouvait alors obtenir des résultats pratiques que dans les cas les plus simples. Aujourd'hui alors que l'utilisation des calculatrices par les ingénieurs est une pratique courante, les méthodes progressistes basées sur la théorie des processus stochastiques sont d'une actualité exclusive.

Aussi faut-il souligner les avantages essentiels des méthodes analytiques du professeur Kartvélichvili par rapport aux méthodes ordinaires de calcul pour l'établissement des projets. Si en particulier on a en vue le réglage de l'écoulement fluvial à un rendement donné, dans les calculs aux équations intégrales démontrés dans la monographie, on utilise non seulement toute information sur le processus d'écoulement contenue dans les observations hydrométriques mais aussi une série de considérations génétiques sur l'écoulement qui sont nécessaires à la construction des fonctions de transition régissant le processus d'écoulement. Or dans les calculs ordinaires sur les périodes caractéristiques ou sur toutes les observations qu'on possède, l'infor-

mation sur l'écoulement est loin d'être utilisée complètement. Le calcul d'après les longues séries artificielles obtenues par le jeu de réalisation du processus d'écoulement (par la méthode Monte-Carlo), lui non plus n'est pas très sûr pour des raisons purement mathématiques. Ce calcul en fin de compte revient à une intégration numérique de l'équation de l'équilibre d'eau dans le réservoir avec un grand nombre de pas, ce qui conduit à une grande accumulation des fautes. Or l'utilisation des équations intégrales, dont le processus numérique de solution ne conduit pas à une accumulation des fautes, élimine toutes les difficultés de calcul à la fois.

Quand on doit régler l'écoulement à un rendement dont la valeur est définie par les règles qui ne sont pas en rapport avec l'afflux prochain, les pronostics de l'écoulement ne sont pas utilisés. Or pour les problèmes d'optimisation du réglage de l'écoulement le pronostic est nécessaire, notamment comme une fonction conventionnelle de la distribution des probabilités de l'écoulement. Si on cherche la solution des problèmes d'optimisation à l'aide des hydrographes, on introduit dans le calcul la condition fautive d'avoir beaucoup de temps à l'avance un pronostic univoque exact. Or, en réalité, on n'a sur l'afflux prochain qu'une information probabiliste dont on tient compte dans le calcul probabiliste démontré dans la monographie. On obtient un résultat si optimal que c'est en général possible en principe dans des conditions réelles. Un grand avantage des méthodes probabilistes du professeur Kartvélichvili consiste notamment en ce qu'elles donnent la solution des problèmes d'optimisation insolubles par les méthodes ordinaires du calcul.

Le centre de gravité de la monographie est dans la théorie du réglage de l'écoulement. Les exemples numériques inclus dans la monographie ne poursuivent pas le but de lui donner le caractère d'un manuel de calcul et ne servent qu'à l'illustration de la théorie. Cependant du point de vue des étudiants et des ingénieurs-praticiens il serait souhaitable d'avoir un manuel de la théorie du réglage de l'écoulement fluvial construite sur la base de la théorie des processus probabilistes. Dans un tel cours les méthodes développées dans la monographie du professeur Kartvélichvili pourraient être présentées sous l'aspect destiné aux lecteurs inexpérimentés et dotées d'explications qui puissent faciliter leur utilisation pratique.