Note sur l'estimation des débits de crues

On the estimation of flood discharges

PAR G. MORLAT

INGÉNIEUR AU SERVICE DES ETUDES ET RECHERCHES HYDRAULIQUES A ELECTRICITÉ DE FRANCE.

English synopsis, p. 580.

La question des débits de crue donne lieu aux travaux d'une Commission spéciale de la S.H.F.

Ce travail de M. MORLAT donne le point de vue d'un statisticien tel qu'il l'a exposé à la première réunion de cette Commission.

SOMMAIRE

I. — INTRODUCTION.

Définition d'une crue. — Importance de considérations économiques dans le choix de la crue à prévoir.

II. — L'EMPLOI DE FORMULES EMPIRIQUES.

Nous classons, sous cette rubrique traditionnelle, les méthodes visant à déterminer un débit de crue d'après des renseignements très généraux : le plus souvent, ce sera l'ensemble des plus grandes crues observées dans une région, ou même à la surface du globe.

III. — LES MÉTHODES STATISTIQUES.

Ces méthodes ont été appliquées presque exclusivement à l'analyse de relevés de débits concernant le cours d'eau étudié. Leur emploi a donné lieu parfois à des erreurs graves, par suite d'une connaissance insuffisante de certaines notions statistiques élémentaires.

IV. — LES MÉTHODES ANALYTIQUES.

Il s'agit ici des procédés dont l'objet essentiel est l'analyse du mécanisme de formation des débits à partir des pluies. Leur caractère analytique est en réalité plus ou moins prononcé, selon la part qui est attribuée aux pro-

priétés hydrauliques du bassin. Les variantes en sont fort nombreuses.

V. — POSSIBILITÉ DE SYNTHÈSE PLUIES-DÉBITS.

Un outil mathématique extrêmement puissant a pu être introduit (LE CAM), traduisant en termes précis l'essentiel des méthodes envisagées au chapitre précédent. Cet outil doit permettre de combiner les renseignements apportés par les séries pluviométriques et hydrométriques, ainsi que certaines propriétés hydrauliques du bassin.

VI. — LA NOTION DE PROBABILITÉ EN HYDROLOGIE.

Mais pour justifier pleinement une synthèse logique des diverses méthodes d'approche, comme pour utiliser éventuellement d'autres informations, de caractère plus qualitatif, bien que non négligeables, il est nécessaire de revenir sur les fondements de la notion de probabilité. De nombreux spécialistes, dans le souci louable de résoudre des difficultés classiques, ont abouti à une notion fort restreinte, bien que précieuse dans des problèmes tels que le contrôle des fabrications (fréquentistes); il faut au contraire, en hydrologie, adopter les vues plus profondes exprimées par d'autres auteurs (KEYNES, HALPHEN).

I. — INTRODUCTION

Le présent mémoire vise, d'une part, à rendre compte de l'état actuel du problème, tel qu'il ressort des communications présentées au Congrès des Grands Barrages de New-Delhi — et

d'autre part à préciser les raisons profondes, et quelque peu philosophiques, de l'emploi de la notion de probabilité en hydrologie : cette notion joue en effet un rôle tout à fait primordial dans

la détermination des crues à prévoir pour les ouvrages hydrauliques.

Des communications présentées à New-Delhi, je retiendrai seulement celles qui se rattachent assez directement à l'aspect hydrologique du problème, laissant de côté les exposés, par ailleurs fort intéressants, qui avaient trait à des aspects différents : étude des propriétés hydrauliques des déversoirs, de leur disposition, propagation des intumescences, etc.

IMPORTANCE DU PROBLÈME.

L'importance du problème hydrologique a été soulignée par un grand nombre d'auteurs. Pour citer seulement M. PARDÉ, des exemples montrant « les conséquences funestes que peut avoir la sous-estimation des débits de crue » sont bien connus. M. PARDÉ nous en rappelle quelques-uns parmi les plus frappants : le désastre de l'Orba à Ortiglieto en 1935, dû à un débit de 2.200 m³/s, alors qu'on n'avait prévu que 850 m³, — celui du barrage de Fergoug (Algérie) sur l'oued Hammam, en 1927, avec une crue de l'ordre de 4.000 à 5.500 m³/s (1.500 m³ prévus), et le débit de 7.350 m³/s de la Kansas River à Kansas City en 1903 (maximum prévu 4.000 m³). Un autre conférencier, M. RAO, a cité le cas d'une rivière indienne, la Cauvery, qui a débité, en 1924, 456.000 pieds cubes/s, alors qu'on n'avait prévu que 250.000 pour un projet de barrage (la crue ayant modifié le site, le projet a dû être révisé).

DÉFINITION D'UNE CRUE.

Quelques auteurs ont souligné la complexité de la notion même de « crue » : même si on se borne à considérer une seule station sur un cours d'eau, une crue n'est pas seulement un chiffre de débit maximum, mais elle comporte aussi l'évolution de ce débit en fonction du temps, au cours d'une période de durée variable. Cette remarque a une importance considérable pour l'étude des dégâts causés par un débit dépassant la capacité des déversoirs. Une tentative pour analyser la forme de l'onde de crue a été faite notamment par M. BRATANEK (Tchécoslovaquie).

La plupart des auteurs ont admis, explicitement ou non, qu'on peut se borner à caractériser une crue par le débit maximum atteint. Même dans ce cas, la définition reste ambiguë. On peut, par exemple, dire qu'il y aura crue chaque fois que le débit dépassera un niveau fixé d'avance. La plupart du temps on considère la « crue annuelle » qui est le plus fort débit atteint dans l'année. Signalons encore une légère ambiguïté

résultant de l'époque choisie pour faire débiter l'année (année civile ou année hydrologique).

Certains ont cherché à assigner aux crues une limite physique, c'est-à-dire une valeur du débit qui ne peut être dépassée. D'autres ont affirmé qu'un tel concept est dépourvu de sens. Ce qui est certain, c'est que le débit d'un cours d'eau n'est pas rigoureusement illimité : M. PARDÉ a souligné l'absurdité qu'il y aurait à admettre pour la Seine à Paris des débits de 50.000 m³/s. (Heureusement il n'est aucune des lois de probabilité effectivement utilisées par les hydrologues qui n'attribuerait à ce chiffre de 50.000 m³ une probabilité astronomiquement petite; nous reviendrons là-dessus.) On doit ajouter que tous ceux qui ont cherché à atteindre effectivement la limite physique des débits se sont heurtés ou bien à des incertitudes immenses, ou bien à des valeurs de crues trop fortes, donc assez invraisemblables pour qu'on soit justifié à substituer à ces « crues maximum possibles » des « crues maximum probables ». Un certain nombre d'Américains notamment ont été conduits à cela : nous citerons particulièrement RIESBOL et RYDELL, qui, se référant au « Standard Project Flood » adopté généralement, selon M. RYDELL, par le Corps des Ingénieurs américains, définissent la « crue maximum probable » comme celle provoquée par la chute des précipitations les plus défavorables qui se puissent rencontrer, sur un bassin possédant des conditions d'écoulement « moyennes » (et non pas les plus défavorables).

ASPECT ÉCONOMIQUE DU PROBLÈME.

Si l'on veut envisager une solution plus précise, il faut résoudre dans chaque cas particulier un problème économique très complexe, consistant à mettre en balance des dépenses certaines, nécessitées par les ouvrages de protection, et les dégâts éventuels, difficiles à évaluer, que pourrait provoquer par hasard l'apparition d'une crue catastrophique. Ce point très important a été souligné par un nombre notable d'auteurs. MM. DANIEL et BLANCHET l'ont schématisé de la façon la plus claire, en proposant le secours d'une méthode graphique certainement apparentée aux travaux de M. DANIEL sur « la répartition optimum des charges entre les groupes d'une centrale hydro-électrique ».

C'est M. RIESBOL qui a donné à l'examen du problème économique la place la plus large. Il a fait une description très détaillée des dégâts qu'il faut envisager : pertes matérielles de divers ordres, pertes en vies humaines, et même perte de prestige pour le maître d'œuvre qui fixe les risques à courir. Si l'on tient compte correctement de tous ces éléments, on peut con-

sidérer le coût d'un déversoir comme une assurance. La notion de la rentabilité de cette assurance est primordiale. Il est entendu que pour obtenir une absolue sécurité, le coût des ouvrages serait en général prohibitif (1), M. RIESBOL reconnaît qu'en pratique l'emploi d'une méthode actuarielle intégrale pour fixer les risques à courir n'a encore jamais été tenté, l'ampleur des calculs étant excessive. Aussi, après avoir souligné en détail toutes les considérations qui, en droit, devraient intervenir, M. RIESBOL conclut que le Bureau of Reclamation (U.S. Department of Interior) prend des décisions de façon assez synthétique, dépendant de la situation des ouvrages (régions très habitées ou désertiques par exemple) : on situera ainsi la crue à prévoir entre la crue maximum possible et la crue maximum probable. Deux autres auteurs américains, MM. HATHAWAY et RYDELL, ont développé des considérations recoupant assez bien celles que nous venons de résumer.

Dans un opuscle intéressant à bien des égards, l'hydrologue néo-zélandais SCHNACKENBERG (2) signale les critères suggérés dans son pays il y a quelques années par une Commission de spécialistes, et nous en extrayons les recommandations suivantes :

Pour les projets de déversoirs de barrages, le Comité recommande les fréquences minimum suivantes :

1. Barrages dont la rupture entraînerait des risques sérieux de pertes de vies humaines :

a :

Barrages en terre et en enrochements et tous barrages soumis à un risque de destruction rapide dépassant la valeur prévue.....	1.000 ans
--	-----------

b :

Barrages en béton et en maçonnerie, non soumis à un risque de destruction rapide	500 ans
--	---------

2. Barrages ayant un coût de remplacement élevé, dont la rupture n'entraînerait pas de risque sérieux de pertes de vies humaines..... 500 ans
3. Barrages ayant un coût de remplacement modéré, dont la rupture n'entraînerait pas de risque sérieux de pertes de vies humaines..... 100 ans
4. Barrages ayant un faible coût de remplacement dont la rupture n'entraînerait pas de risque sérieux de pertes de vies humaines..... 20 ans

(1) « L'excès de prudence dans le choix de la crue « administrative », constate M. Giguët, appauvrit la collectivité aussi sûrement que le ferait une faute technique... » (*Travaux*, mai 1951.)

(2) SCHNACKENBERG. — « Extreme flood discharges », *New Zealand Institution of Engineers*, Wellington, 1949.

Il peut être intéressant de rapprocher les normes que nous venons de citer, de l'attitude prise fréquemment dans un problème tout différent : celui qui consiste à fixer la garantie admissible dans la fourniture d'énergie électrique; on dira souvent qu'on juge admissible, par exemple, trois défaillances par siècle.

Dans les deux cas, on a affaire en droit à un problème économique, du type « assurance » : même si les grandeurs entrant en jeu ne peuvent pas toujours s'exprimer en termes monétaires, il s'agit bien de mettre en balance des risques fort aléatoires, avec les frais certains qu'entraîne le dispositif propre à nous prémunir contre ces risques. Et c'est bien à cause de la diversité des risques que les normes citées plus haut constituent une gamme assez ouverte.

Dans le même ordre d'idées, nous signalerons que M. COUTAGNE, reprenant une idée développée par M. BOREL (et d'ailleurs déjà exprimée par BUFFON), propose d'opérer de façon très synthétique en admettant de courir des risques comparables à ceux que l'on accepte en général dans la vie courante (10^{-6} d'après BOREL). Pourtant, MM. DROUHIN, MALLET et PACQUANT font observer que le public admet plus facilement la possibilité d'accidents en matière de voiture, de chemin de fer ou même d'avion qu'en matière de grands barrages. Le public a peut-être quelque espèce de raison si l'on songe que bien souvent les dégâts sont à des échelles toutes différentes.

QUALITÉ DES DONNÉES D'OBSERVATION.

Avant d'en finir avec cette introduction un peu longue peut-être, nous voulons signaler que plusieurs auteurs (comme MM. HUNTER et VILMOT, PARDÉ, etc.), ont insisté avec raison sur l'attention qu'il faut accorder avant toutes choses à la qualité des relevés sur lesquels seront fondées les évaluations — qu'il s'agisse de relevés de débits ou de précipitations. On connaît trop les difficultés auxquelles se heurte cette exigence. C'est ce qui justifie pleinement la mise en garde de M. COUTAGNE selon laquelle « le problème ne comporte pas de solution générale à priori, et doit par conséquent être étudié et résolu dans chaque cas particulier, compte tenu de toutes les données expérimentales de toute nature... que l'on possède sur le cours d'eau et son bassin, et en s'inspirant plus ou moins, pour suppléer au manque ou à l'insuffisance des données d'observations locales, de certaines considérations générales, de certaines formules statistiques et empiriques résultant d'observations et constatations faites sur d'autres cours d'eau de la région et même d'autres régions ». M. PARDÉ, quant

à lui, a longuement insisté aussi sur l'intérêt qu'il y aura fréquemment à faire des recherches historiques approfondies pour multiplier les informations, pourvu que ces recherches soient faites avec un sens critique averti.

Les nombreuses méthodes d'attaque exposées se classent assez bien en trois grandes catégories que nous désignerons, faute de termes meilleurs, par formules empiriques, méthodes statistiques

et méthodes analytiques. On verra qu'en réalité ces méthodes sont loin d'être en concurrence : chacune d'elles s'appuie sur un choix délibéré, limitant arbitrairement les informations prises en compte. Cette constatation fait apparaître la nécessité aiguë d'une synthèse. Certes, un travail énorme reste à accomplir, mais on peut déjà donner quelques idées générales propres à guider le chercheur dans cette direction.

II. — L'EMPLOI DE FORMULES EMPIRIQUES

Sans que ce soit là une règle absolue, on peut dire que les méthodes que nous classerons dans ce chapitre mettent surtout l'accent sur les informations d'ordre général ressortant de la comparaison d'un grand nombre de bassins.

EMPLOI D'UN COEFFICIENT DE SÉCURITÉ

Il en est ainsi implicitement de la méthode la moins élaborée, qui consiste dans chaque cas particulier à appliquer un coefficient de sécurité à la plus grande crue connue. Les renseignements retenus sur la rivière considérée sont réduits à cette unique crue, et la véritable justification de la méthode consiste dans son application plus ou moins homogène à un grand nombre de bassins. Cette méthode est très employée : les Australiens, selon MM. BAIRD et Mc ILLWRAITH, l'emploient concurremment avec d'autres méthodes, en tenant compte dans le choix des coefficients de sécurité de l'effet des réservoirs. M. JOKSIMOVIC nous apprend que les Yougoslaves choisissent des coefficients de sécurité dépendant de l'importance des ouvrages. M. DUFFAUT souligne également l'emploi de cette méthode en France.

Je n'insisterai pas trop sur le danger qu'il y aurait à fixer une fois pour toutes le coefficient de sécurité à employer, sans tenir aucun compte des conditions particulières (observations portant sur 10 ans ou sur 150 ans, cours d'eau alimenté par un glacier ou par des averses méditerranéennes, etc.) ; mais il faut attirer l'attention sur le fait que la façon dont on le fera varier constitue un problème extrêmement délicat : ce choix doit intégrer en effet les éléments économiques auxquels nous avons fait allusion, ainsi que tous les renseignements qui peuvent nous éclairer sur la fréquence probable, non seulement de l'unique crue retenue, mais aussi des crues plus importantes. Aussi, on peut penser que, dans bien des cas, il y aura intérêt à pousser un peu plus loin l'analyse. C'est l'objet des méthodes que nous allons signaler maintenant.

FORMULES FAISANT INTERVENIR LES CARACTÉRISTIQUES DU BASSIN

Elles sont nombreuses, et M. DAVIS (*Handbook of Applied Hydraulics*) n'a pas eu de peine à en réunir près d'une cinquantaine, toutes différentes, cette énumération étant sans doute loin d'être complète.

Ces formules traduisent en principe les enseignements tirés de l'étude d'un grand nombre de bassins, ou encore déduits par voie analytique des caractères hydrauliques de l'écoulement) — mais ne sont en général valables que pour des régions très limitées, lorsqu'elles sont entièrement spécifiées numériquement. Elles visent à exprimer, soit une crue considérée comme maximum, soit plus généralement une crue assez respectable, ou encore correspondant en principe à une probabilité fixée.

Elles font intervenir successivement, lorsqu'on va des plus simples aux plus complexes :

- L'aire du bassin, généralement affectée d'un exposant inférieur à 1, souvent égal à 0,5 : formule de MYER, KUICHLING, GAN-GUILLET, etc. — parfois à 0,75 : DICKENS (Inde), WOOD (N.Z.), etc.
On trouve aussi : $2/3$ (COOLEY) — $0,75$ (METCALF, EDDY), — $5/6$ (FANNING).
- Sa forme, en général, grâce à l'introduction d'une longueur, temps de parcours, ou temps de concentration : formules de CRAIG, DREDGE, BURGE, etc.
- L'intensité de la pluie : HERING, PETTIS, etc.
- La pente du bassin : BURKLI, ZIEGLER, Cramer.
- Enfin un certain nombre de formules introduisent la fréquence des crues exprimées : FULLER, HORTON, LANE, CREAGER, etc.

Dans cette dernière catégorie, certaines formules (FULLER, MALLET) condensent un raisonnement d'ordre statistique, leur forme analyti-

que étant déduite de certains types de lois de probabilité.

L'emploi de toutes ces formules sera en général dangereux chaque fois qu'on ne connaîtra pas de façon approfondie les conditions dans lesquelles elles ont été établies.

Les Américains se sont livrés à une étude très poussée de la formule la plus simple, celle de MYER :

$$Q = CA^a$$

Q = crue à craindre.

A = aire du bassin.

a étant en général pris égal à $1/2$, on a tracé pour les Etats-Unis des cartes du coefficient C, dit « cote Myer ». Ces cartes montrent des variations très capricieuses (1). Un travail analogue a été effectué dans un certain nombre d'autres pays.

La communication de M. TONINI cite un nombre considérable de formules de ce type, établies par les hydrologues italiens. Le choix des coefficients a donné lieu à des études assez poussées pour les bassins italiens, et M. TONINI souligne les dangers que rencontrerait une extrapolation inconsiderée à d'autres régions.

M. COUTAGNE a cité de son côté, avec les mêmes réserves, quelques formules assez complexes. Il insiste sur leur caractère très approximatif.

La communication de M. RAO a le mérite d'indiquer, pour une trentaine de formules de ce genre, un tableau comparatif des résultats obtenus sur un fleuve indien. Ce tableau montre la dispersion énorme des résultats.

Les critiques de M. PARDÉ à l'égard de l'emploi systématique de formules empiriques vont dans le même sens : il signale par exemple que les records constatés pour la Loire seraient de 9 à 10.000 m³ au Bec d'Allier, contre seulement 6.000 à 6.500 à Nantes. Il insiste en détail sur un certain nombre de difficultés de ce genre.

Signalons enfin que des formules empiriques du même type ont été étudiées dans le domaine des averses maxima : entre autres, l'exposé de MM. BAIRD et Mc ILLWRAITH signale les formules établies empiriquement pour l'Australie, faisant intervenir en même temps que la fréquence la durée des averses.

LA MÉTHODE DES COURBES ENVELOPPES

Si nous avons réservé une place à part à la méthode dite des « courbes enveloppes », ce n'est

pas qu'elle soit plus précise, bien au contraire. Mais elle apporte des renseignements extrêmement généraux pour une région donnée et elle a donné lieu à quelques remarques intéressantes.

Tous les traités d'hydrologie américains récents contiennent cet abaque assez familier, dans lequel on a porté, avec des échelles généralement logarithmiques, les plus fortes crues spécifiques observées en fonction de l'aire des bassins.

Les points ainsi représentés ne semblent pas dépasser une position limite, à laquelle divers auteurs ont essayé d'ajuster des courbes analytiques (MYER, CREAGER, etc.) (1).

Un travail analogue a été fait pour divers pays (Mexique, Suisse, Australie, Nouvelle Zélande, etc.) et la position des courbes limites s'est avérée varier considérablement.

Cela a permis à MM. BAIRD et Mc ILLWRAITH de proposer ingénieusement, pour les rivières australiennes sur lesquelles ils n'ont aucune information, de choisir pour valeur de la crue type un point situé entre les courbes enveloppes relatives à l'Australie et aux U.S.A., la position de ce point dépendant de l'importance des dégâts encourus. Ajoutons que les Australiens, en gens avisés et prudents, ne paraissent utiliser cette méthode assez originale que concurremment avec d'autres procédés d'estimation.

M. COUTAGNE donne dans sa communication des abaques de ce type pour diverses régions de France, en y portant tantôt la crue maximum observée, tantôt le débit maximum des ouvrages d'évacuation. Les résultats, bien que fort intéressants, sont moins frappants que ceux des Américains, qui ont pu réunir des quantités beaucoup plus grandes d'observations.

Enfin, M. RIESBOL, ayant signalé ce genre d'abaques, nous met judicieusement en garde contre les interprétations qu'on pourrait donner à la « courbe enveloppe » : il rappelle qu'au fur et à mesure que les années passent, des crues catastrophiques encore jamais observées arrivent à se produire parfois, qui obligent à déplacer la courbe limite. Et il ajoute « qu'aucune indication qu'une limite supérieure ait été atteinte n'est encore apparente ».

Nous venons d'exposer des méthodes qui semblent assez couramment employées, et qui mettent plus ou moins fortement l'accent sur l'emploi d'informations provenant de l'étude d'un certain nombre de bassins — ce que nous pourrions appeler des renseignements d'ordre global.

D'autres méthodes, laissant au second plan cette catégorie d'informations, s'attachent à uti-

(1) Voir par exemple : MEINZER, *Hydrology* (N.Y., 1949), p. 458-459. Un des principaux inconvénients de ce genre d'emploi systématique, c'est qu'on n'a pas trouvé jusqu'ici le moyen de tenir compte simplement de la diversité — en général très grande — des périodes de relevés.

(1) Cf. SCHNACKENBERG, « Extreme flood discharges », Wellington, 1949.

liser au maximum les seuls relevés de débits de la station pour laquelle on cherche à évaluer la crue : on est ainsi conduit à un large emploi

des techniques statistiques, et nous allons faire une revue des diverses variantes de cette méthode.

III. — LES MÉTHODES STATISTIQUES

L'idée la plus naturelle consiste à prendre les crues annuelles observées sur les N années dont on dispose, et à y ajuster une loi de probabilité.

A cette méthode est resté souvent attaché le nom de HAZEN, cité à New-Delhi par plusieurs auteurs. Sa mise en œuvre peut s'effectuer soit par un procédé purement graphique, soit par l'intermédiaire d'un type analytique de loi de probabilité.

LE PROCÉDÉ GRAPHIQUE

Le procédé graphique comporte lui-même diverses variantes, suivant le choix des échelles : valeurs naturelles ou logarithmes pour les débits, et pour les probabilités, valeurs naturelles, logarithmes, temps de récurrence ou « probit », c'est-à-dire variable normale réduite correspondant à chaque probabilité. L'extrapolation se fait généralement par une droite, ajustée soit sur l'ensemble des observations, soit sur la partie supérieure. Il est à peu près évident que les résultats dépendent beaucoup de la méthode utilisée. M. LE CAM avait essayé l'an dernier de donner une idée des erreurs d'échantillonnage. Le calcul en est évidemment complexe, mais des expériences ont permis d'y suppléer, et on a pu montrer que si l'on part d'une loi de Galton, avec 25 observations, l'écart-type de l'estimation graphique de la crue millénaire est sans doute supérieur à 100 % de la valeur estimée.

LES LOIS LES PLUS EMPLOYÉES

On réduit l'arbitraire par le procédé consistant à ajuster une forme analytique de loi de probabilité. Les types effectivement employés sont nombreux, nous énumérerons les principaux.

La loi de GAUSS est parfois employée, mais généralement on la rejette à cause de sa symétrie : c'est une constatation empirique très générale que la distribution des crues est dissymétrique.

La loi de GALTON, citée ou employée notamment par MM. HUNTER et WILNOT, COUTAGNE, MALLET, GIBRAT, DELATTRE et HENRY, PARISOT

et RODIER, etc., traduit bien cette dissymétrie. Mais il semble que son comportement asymptotique traduise une décroissance trop lente dans certains cas. Aussi a-t-on souvent utilisé la loi de GUMBEL, plus satisfaisante à cet égard (COUTAGNE, GIBRAT, BOSE et NAG, PARISOT et RODIER). Nous reviendrons sur les justifications théoriques qui ont été données à ces deux derniers types de lois. Sans prétendre être exhaustif, on peut compléter cette énumération par quelques autres lois effectivement utilisées : Première loi de LAPLACE. — Types de PEARSON (et particulièrement le type III utilisé par l'éminent hydrologue américain FOSTER). — Lois de SLADE, dérivant de la loi de GALTON par des substitutions homographiques. — Lois de GOODRICH, dérivant de la loi de LAPLACE par des transformations simples. — Enfin lois de M. HALPHEN dont nous avons parlé il y a deux ans à la S.H.F. (1).

Il est intéressant de comparer les différences entre les comportements asymptotiques de toutes ces lois. Ces différences sont plus apparentes si on exprime les crues en fonction de leur période de récurrence, comme l'a fait notamment M. COUTAGNE. Nous empruntons les résultats à une étude de M. LE CAM :

Loi de GAUSS..... $Q \sim \sqrt{\log T}$

Loi de LAPLACE.... $Q \sim \log T$

Loi de GALTON..... $Q \sim \exp \sqrt{\log T}$

Loi III PEARSON... $Q \sim \log T$

Lois de SALDE..... $Q \sim \frac{a \exp. \left(\frac{\sqrt{\log T}}{\sqrt{\log T}} \right) + b}{c \exp \left(\frac{\sqrt{\log T}}{\sqrt{\log T}} \right) + d}$

Loi de GUMBOL..... $Q \sim \log T$

Loi de GOODRICH... $Q \sim \left(\frac{\alpha \log T + \beta}{\gamma \log T + \delta} \right)^{1/c}$

Lois de HALPHEN... $\left\{ \begin{array}{l} Q \sim \log T \text{ pour le type A} \\ Q \sim \sqrt{\log T} \text{ pour le type B} \end{array} \right.$

Bien entendu nous n'exprimons là que l'allure du comportement asymptotique. Dans un cas par-

(1) « Les lois des débits des rivières françaises » (LE CAM et MORLAT).

ticulier, les écarts obtenus par l'utilisation de deux de ces lois dépendront des procédés d'ajustement respectivement utilisés. Un graphique établi par M. LE CAM (fig. 1) permet de comparer

FIG. 1. — Ce graphique est destiné à montrer la différence du comportement asymptotique de diverses lois. On a fait coïncider les points de probabilité 1/2 et 1/10. Les courbes en pointillé sont les courbes de confiance à 95 % sur la variable s lorsque l'on a un échantillon de 40 points représenté expérimentalement par une loi voisine de celle de GUMBEL.

quelques-unes de ces lois lorsque l'ajustement fait coïncider les points de probabilités 50 % et 10 %. Par ailleurs, la communication de M. COUTAGNE contient des graphiques analogues relatifs à deux rivières américaines : Columbia River et Kansas River — les procédés d'ajustement n'étant peut-être pas précisés de façon complète.

REMARQUES GÉNÉRALES SUR LES MÉTHODES STATISTIQUES

L'emploi de ces lois de probabilité a été parfois critiqué, en particulier par M. PARDÉ, qui a donné à New-Delhi un certain nombre de remarques fort judicieuses. Mais nous croyons bon de

souligner que la plupart des critiques valables qui ont été avancées à l'encontre des méthodes statistiques résultent de malentendus. A la question que pose M. PARDÉ : « Tout d'abord, est-on sûr que les possibilités de tous les cours d'eau, en ce qui concerne les grandes inondations, sont intégrées et inscrites, incorporées comme sont semés des germes, dans les parties basses, expérimentales des courbes? », à cette question qui touche au cœur même du problème, on doit répondre par les observations suivantes : lorsqu'on dispose de sources d'informations valables autres que les relevés de crues, alors certainement les méthodes dont nous venons de parler, n'utilisant pas ces informations, ne constituent pas ce qu'on peut faire de mieux. Mais si, au contraire, nous ne savons rien d'autre que les valeurs des crues observées pendant n années ou si nous avons décidé de n'utiliser rien d'autre, alors l'extrapolation d'une courbe de probabilité judicieusement ajustée paraît être la seule chose possible, et d'ailleurs M. PARDÉ l'admet comme nous, semble-t-il. Que cette extrapolation soit hasardeuse, soit. Mais aucun statisticien ni personne d'autre à notre connaissance, ne saurait faire sortir un lapin d'un chapeau qui ne contient que de la farine. Dans le cas simple où on peut répondre par « oui » à la question de M. PARDÉ, j'ajouterai que les statisticiens cherchent à chiffrer ce carac-

FIG. 2. — ERREURS D'ÉCHANTILLONNAGE DANS L'ÉVALUATION D'UNE CRUE « MILLÉNAIRE » PAR LE PROCÉDÉ GRAPHIQUE HABITUEL.

(Répartition expérimentale de 20 valeurs extrapolées à partir d'échantillons de 25 points.)

La loi de départ est ici un type III de PEARSON. On a construit des échantillons de 25 points à l'aide des tables de FISHER et YATES (Random numbers). L'extrapolation graphique pour la crue millénaire effectuée sur 20 séries distinctes, a donné les valeurs dont la distribution est figurée par le polygone de droite. On constate une dispersion assez notable.

tère hasardeux, en calculant ce qu'on appelle les erreurs d'échantillonnage. Un tel calcul s'avère extrêmement complexe, en général, dans le problème des crues, mais on peut en donner des solutions approximatives (voir fig. 2).

Rappelons aussi que les instructions données aux ingénieurs américains par le *Geological Survey* (qui paraissent constituer un document semi-officiel bien que ne devant pas être rendu public) font état d'une méfiance très nette à l'égard des méthodes statistiques. Peut-être le développement des méthodes analytiques, basé sur l'étude de l'écoulement des fortes averses, est-il assez poussé aux Etats-Unis pour que les autres méthodes prennent en apparence une importance secondaire. Mais ce n'est peut-être pas exact en général.

MISE EN GARDE CONTRE QUELQUES DANGERS FRÉQUENTS

Avant de clore cette revue un peu rapide des méthodes statistiques courantes, il semble indispensable de rappeler un certain nombre de points délicats, qui ont conduit des auteurs insuffisamment prévenus à des affirmations discutables, et parfois inexactes.

On peut d'abord remarquer d'une façon générale que certains hydrologues auraient intérêt à avoir une notion claire de ce que les statisticiens

appellent « erreurs d'échantillonnage » dont nous venons de parler. C'est un point sur lequel M. PARDÉ a longuement insisté, quoique en un langage tout différent. Cela éviterait des affirmations faites sans précaution, comme celle de ces auteurs qui conseillent, dans les ajustements statistiques des séries de crues, d'éliminer systématiquement les points qui paraissent aberrants. Le danger d'une telle consigne n'a pas besoin d'être souligné.

Ensuite, nous indiquerons l'utilité qu'il y a à ne pas oublier que les débits des différents jours de l'année sont pour la plupart des rivières, très loin de suivre la même loi de probabilité, et aussi très loin d'être indépendants. Cet oubli rend parfois dangereux l'emploi de la méthode préconisée par M. GIBRAT, qui consiste à prendre en compte tous les débits et non pas seulement les crues annuelles. Si ce procédé pouvait améliorer l'information dans le cas où M. GIBRAT lui-même l'a utilisé (en particulier pour la Truyère), par contre on peut facilement imaginer en erreur : il suffit de penser à un cours d'eau présentant des hautes eaux d'été très prédominantes, mais très régulières parce que d'origine glaciaire — et ayant systématiquement ses crues en automne et en hiver, par suite de la présence d'un bassin pluvial à régime beaucoup plus irrégulier. Alors le mélange de tous les débits risque de fausser systématiquement l'extrapolation (voir fig. 3).

FIG. 3. — CRUES DU RHIN A STRASBOURG.

D'autre part, il ne faut pas non plus oublier l'existence de corrélations spatiales (entre les crues de divers bassins) dont le rôle est parfois essentiel : ainsi des auteurs ont affirmé qu'ils pouvaient suppléer à la brièveté des relevés historiques pour tel bassin, en y joignant les relevés d'un certain nombre de bassins voisins. Il est bien clair que si l'on a affaire à une région très homogène, tel le Massif Central, c'est là une dangereuse illusion de sécurité.

Terminons en soulignant les malentendus qui sont à l'origine des privilèges souvent attribués à certains types de lois, dites « lois théoriques » ou « lois ayant un fondement rationnel ».

M. GIBRAT a lui-même rappelé, dans sa communication à New-Delhi, que la loi de GALTON dont il a préconisé l'emploi constitue seulement « une représentation mathématique convenable de la courbe des débits classés ». Mais beaucoup des auteurs qui ont utilisé cette loi après lui ont cru y voir la « loi véritable » des débits, prenant à la lettre ce qui n'était chez M. GIBRAT qu'une simple suggestion, à savoir le fait que cette loi pouvait résulter du processus qu'il a appelé l'« effet proportionnel ». Comme l'ont souligné MM. PARISOT et RODIER, il est encore loin d'être prouvé qu'un tel processus existe dans le cas des débits,

Bien entendu, cela n'enlève rien à l'intérêt de la loi de GALTON, qui s'avère empiriquement représenter parfois correctement la répartition des débits.

Des illusions plus dangereuses semblent être entretenues à propos de la loi de GUMBEL. Rap-

pelons que MM. FISHER et TIPPETT, qui ont les premiers introduit cette loi en 1928, avaient souligné que c'était une position limite de la loi de la plus grande de N variables indépendantes, et suivant la même loi de probabilité, pour N très grand. Or, les 365 débits des jours d'une année sont très loin d'être indépendants, très loin de suivre la même loi, et aussi très loin d'être assez nombreux, puisque FISHER et TIPPETT (1), étudiant la rapidité avec laquelle cette loi limite est atteinte, ont conclu à une convergence extraordinairement lente : il faudrait un nombre de l'ordre du million pour avoir une bonne approximation (KENDALL, plus exigeant, cite le chiffre de 10^{22}). On voit que nous sommes loin de compte, et les véritables justifications à l'emploi de la loi de GUMBEL ne sauraient être qu'empiriques : ajoutons que cet emploi s'avère souvent satisfaisant.

Dans plusieurs publications, M. GUMBEL a donné les résultats obtenus pour quelques cours d'eau, en particulier le Rhône à Lyon et le Mississippi à Vicksburg. On constate que l'ajustement de la loi utilisée avec les observations est très bon dans le cas du Mississippi, mais assez discutable pour le Rhône (2).

(1) Limiting Forms of the Frequency Distribution of the largest or smallest Member of a sample. — Proc. of the Cambridge Phil. Soc., vol. 24, p. 180, 1928.

(2) Voir, par exemple :

GUMBEL. — « The return period of flood flows ». *Annals of Mathematical Statistics*, 1941.

— « Théorie statistique des débits de crue ». *Renaissance*, N.Y., 1945.

IV. — LES MÉTHODES ANALYTIQUES

Nous désignons ainsi les méthodes d'investigation dont l'objet est le mécanisme des crues. Il s'agit de calculer au mieux la valeur du débit maximum auquel donnera naissance une averse donnée. Bien entendu, l'étude de ce mécanisme ne donne aucun renseignement par elle-même sur la probabilité des crues obtenues. Les averses dont on part sont le plus souvent considérées comme les averses maximum pouvant se produire sur le bassin, mais on peut craindre qu'il n'y ait dans cette affirmation une incertitude considérable.

LA PROBABILITÉ DES AVERSES

L'étude de la probabilité des averses prises en compte est donc souvent négligée. Un certain nombre d'auteurs s'en sont pourtant souciés.

MM. HUNTER et WILMOT en ont fait une analyse assez qualitative, soulignant surtout les différences qui apparaissent dans les diverses parties du monde, leurs exemples portant sur la Grande-Bretagne d'une part, la côte occidentale de l'Inde d'autre part.

Rappelons aussi les formules empiriques données par MM. BAIRD et Mc ILLWRAITH pour l'intensité des averses maximum, en Australie, en fonction de leur durée et de leur temps de récurrence. Les mêmes auteurs ont constaté que la loi de GALTON s'applique bien à la répartition des plus fortes averses observées au cours de chaque année.

De leur côté, MM. BOSE et NAG ont employé de façon satisfaisante la première loi de LAPLACE à la distribution « tronquée » des plus fortes averses.

Signalons enfin que M. HATHAWAY, qui met

l'accent sur l'étude des averses dans l'évaluation des crues conformément à la tendance d'une grande partie des ingénieurs américains, indique, d'après les observations américaines, des valeurs d'averses maxima en fonction de leur durée (cf. fig. 4).

FIG. 4. — ETUDE DE LA RELATION FRÉQUENCE-DURÉE-INTENSITÉ POUR LES PLUIES A BOSTON (Mass.), d'après SHERMAN.

Il serait bien agréable que nous puissions disposer un jour, en France, de graphiques analogues à celui-ci, établis pour un grand nombre de stations. Les Archives de la Météorologie Nationale contiennent sans doute les chiffres nécessaires à certaines études de ce type et il est à souhaiter que leur exécution puisse être abordée avec les moyens matériels nécessaires.

Remarquons que le graphique ci-dessus ne concerne que des précipitations ponctuelles. La répartition des averses dans l'espace pose un problème plus complexe et non moins important (abordé d'ailleurs dans certaines études américaines récentes).

MÉTHODES DE « TRANSPOSITION DES AVERSES »

Lorsqu'on veut appliquer des méthodes analytiques à des bassins où l'on n'a pas observé en détail d'averses pouvant être considérées comme plus ou moins « maxima », alors on est conduit à y transposer des averses observées sur des bassins voisins. Les précautions à prendre dans ce genre d'opération ont été assez bien indiquées; M. HATHAWAY en expose diverses variantes.

Dans cet ordre d'idées, M. PICCOLI signale que, d'après tous les renseignements qui ont pu être réunis sur les averses en Italie, si l'extension des données d'une station judicieusement choisie à un bassin d'étendue assez limitée s'avère valable sous certaines précautions, par contre, l'extrapolation des valeurs des averses d'un bassin à un autre, même voisin, lui semble très délicate : il a rencontré pour des bassins très voisins des différences de régimes fort sensibles. Peut-être cette constatation est-elle à rattacher au caractère, que nous dirons méditerranéen, du

climat de l'Italie; on sait que ce climat est, d'une façon générale, beaucoup moins uniforme que les climats océaniques.

Ajoutons enfin que M. PARDÉ, qui expose de façon brève mais claire le principe de ces transpositions, indique judicieusement que les bassins à comparer devront être choisis par « un climatologue averti ».

RÔLE DES INFLUENCES NIVALES

Dans de nombreux cas, comme on l'a souvent observé, les crues catastrophiques sont causées par la coïncidence de fortes pluies et de fonte d'un important stock nival. Bien que les deux phénomènes soient assez étroitement imbriqués — la fonte étant accélérée par des chutes de pluies relativement chaudes (par un processus du reste assez complexe, où certains effets mécaniques (déchiquetage) ont sans doute plus d'importance qu'un effet calorifique direct) — il y a pourtant intérêt à évaluer séparément leurs contributions au débit.

M. HATHAWAY a exposé de façon fort concrète les principes du calcul de la contribution nivale : division en zones d'altitude, évaluation par zone du stock nival, des conditions météorologiques et de la fonte résultante en utilisant des « équations de fonte » établies par son compatriote Phillip LIGHT.

M. PARDÉ signale que vraisemblablement une quantité d'eau donnée produira une contribution plus importante à la crue si elle provient de fonte nivale que si elle est due à des averses actuelles : la présence de neige en fusion a chance de diminuer à la fois l'infiltration et l'évaporation.

L'HYDROGRAMME UNITAIRE

Enfin, la partie essentielle des méthodes analytiques réside dans ce que les hydrologues américains SHERMAN et BERNARD ont appelé « l'hydrogramme unitaire ». Il s'agit de la technique qui permet d'évaluer, à partir d'une averse ou d'une contribution nivale donnée, l'augmentation des débits au cours du temps. Cette technique n'a peut-être pas été absolument « inventée » par les hydrologues cités, et M. PARDÉ rappelle qu'il a préconisé depuis longtemps des méthodes qui s'y rattachent étroitement. Mais les Américains ont eu le mérite d'en donner une version extrêmement claire parce qu'assez schématisée, et d'en faire des applications systématiques très poussées (1).

(1) Voir par exemple dans MEINZER (*op. cit.*), le chapitre rédigé par SHERMAN : « The Unit Hydrograph method », pp. 514-525.

Sous sa forme la plus simple, la méthode de l'hydrogramme unitaire fait appel aux postulats suivants :

- 1° Sur un bassin saturé, une averse d'une durée unité et d'une intensité unité donne naissance à un « hydrogramme » qui ne dépend que de la forme du bassin;
- 2° La même averse, avec une intensité i , donne un hydrogramme obtenu en multipliant par i les ordonnées de l'hydrogramme unitaire;
- 3° Des averses successives donnent lieu à un débit obtenu par addition des ordonnées de leurs hydrogrammes respectifs.

En langage mathématique, cela revient à dire qu'on passe des pluies aux débits par un opérateur linéaire.

Des variantes plus ou moins perfectionnées sont très nombreuses — en particulier on peut introduire les débits d'infiltration profonde et infiltration « hypodermique » (voir fig. 5).

De nombreuses études ont été faites en vue de relier les paramètres caractérisant l'hydro-

FIG. 5. — CONSTRUCTION SCHÉMATIQUE D'UN HYDROGRAMME UNITAIRE PAR LA MÉTHODE DITE DE L'AVERSE ISOLÉE (d'après JOHNSTONE et CROSS).

abm : débit de base (courbe de tarissement précédant l'averse).

n : courbe de tarissement après la fin de l'averse.

bed : compte tenu de l'infiltration, la partie du débit située au-dessus de cette courbe représente l'écoulement superficiel.

gramme unitaire aux caractéristiques du bassin (BERNARD, Mc CARTHY, SNYDOR, CLARK, etc...). Nous ne pouvons les exposer ici en détail. Remarquons seulement ceci : en pratique, on détermine

FIG. 6. — BASSIN DE LA HAUTE DURANCE.

Courbes d'égal temps de parcours dans l'hypothèse de vitesses de propagation uniformes.

Nous mettons actuellement au point un programme d'étude détaillée de crues de la Haute Durance. Ce travail nécessitera au préalable un renforcement considérable des réseaux actuels d'observations, tant pluviométriques qu'hydrométriques : nous avons affaire en effet à un bassin caractérisé par une très grande hétérogénéité climatique.

FIG. 7. — HYDROGRAMME SYNTHÉTIQUE.

DURANCE à SERRE-PONÇON.

Des courbes d'égal temps de parcours de la figure 6, on déduit d'hydrogramme ci-dessus, qui résulterait théoriquement d'une averse isolée très courte, uniforme sur tout le bassin.

souvent de façon empirique l'hydrogramme unitaire en examinant le débit qui résulte d'une averse-type suffisamment isolée. La reconstitution des débits ultérieurs à l'aide de cet hydrogramme et la comparaison avec les observations fournit un contrôle automatique dont les conclusions s'avèrent souvent assez satisfaisantes. On peut aussi construire des « hydrogrammes synthétiques » (cf. fig. 6 et 7).

L'exposé de ces méthodes ou des applications variées ont été citées par un grand nombre d'auteurs. Nous nous bornerons à en énumérer quelques-uns : BAIRD et Mc ILLWRAITH, HATHAWAY, COUTAGNE, RAO, PARDÉ, etc...

Les variantes les plus perfectionnées de ces méthodes conduisent à des évaluations assez précises, mais si on les emploie exclusivement on est souvent conduit, comme l'a observé M. LE CAM, à calculer avec une grande précision une crue dont on ignore la probabilité.

V. — POSSIBILITÉ DE SYNTHÈSE PLUIES-DÉBITS

Voici achevée une revue d'ensemble, très brève, des différentes techniques dont on a parlé dans les rapports présentés à New-Delhi. Sans être complet, nous pensons avoir cité les points les plus importants. La plupart des communications avaient évité des détails trop techniques. Nous avons accentué encore ce souci, ce qui confère à cet exposé un aspect parfois un peu imprécis. Mais citer par exemple toutes les lois de probabilité utilisées, ainsi que leurs propriétés essentielles, ou encore toutes les techniques numériques de calcul des hydrogrammes unitaires, nous aurait entraînés trop loin.

LE BESOIN D'UNE SYNTHÈSE

Nous avons surtout tâché de dégager les idées générales, et pour ainsi dire la philosophie des différentes méthodes citées.

Les liens entre ces différentes méthodes ne sont peut-être pas très apparents. C'est que jusqu'ici on les a toujours négligés. Mais l'ordre dans lequel nous avons reconstruit l'ensemble des communications de New-Delhi nous permettra tout à l'heure de montrer où peuvent s'insérer ces liens.

Auparavant, nous voulons signaler une impression qui se dégage à la lecture des divers rapports : il semble que les ingénieurs ou hydrologues qui ont cité une seule méthode d'approche, soit parce qu'ils n'en connaissent pas d'autres, soit parce qu'ils utilisent, par choix ou par

nécessité, des éléments d'information strictement délimités, il semble que ceux-là n'aient eu aucune inquiétude : la méthode qu'ils préconisent est la bonne. Mais il n'en est pas de même des hydrologues — heureusement les plus nombreux — qui ont cité ou employé simultanément diverses méthodes. Ceux-là semblent gênés pour décider si telle méthode vaut mieux que telle autre. Ils sont conduits pour la plupart à conclure comme les Australiens BAIRD et Mc ILLWRAITH qui assurent qu'en Australie on emploie simultanément 6 méthodes (formules empiriques — facteur de sécurité — courbe enveloppe — lois de probabilité — carte pluviométrique — hydrogramme unitaire) et la décision tient compte des divers résultats.

Peut-être verra-t-on qu'il y aurait quelque intérêt à soumettre à l'analyse le processus par lequel s'effectue cette combinaison. Mais il apparaît aussitôt que le problème doit être repris à la base (au moins théoriquement). En effet, les méthodes que nous avons groupées sous le titre un peu vague de « formules empiriques » utilisent exclusivement pour la détermination de la crue les informations à priori qui peuvent être suggérées par l'étude antérieure d'un certain nombre de bassins; les méthodes dites « statistiques » se bornent au contraire aux statistiques de débits — et les procédés qualifiés d'« analytiques » tablent sur les données pluviométriques, en mettant l'accent sur le mécanisme de passage pluies-débits, et en négligeant d'ailleurs assez souvent le côté « probabilité des averses ».

Ces trois classes d'informations sont certainement les plus importantes, bien qu'on puisse parfois rencontrer d'autres renseignements valables. Dans la plupart des cas concrets, on se trouvera en présence d'informations de chaque sorte, et on imagine facilement que le traitement le plus efficace pour en extraire le plus d'information sur la crue qui nous intéresse ne soit peut-être pas de traiter chaque catégorie de données comme si les autres n'existaient pas.

LE SCHÉMA PROBABILISTE « PLUIES-DÉBITS »

Pour combiner les diverses informations dont nous venons de parler, il est essentiel de disposer d'abord d'un schéma mathématique représentant la façon dont les pluies donnent naissance au débit. Des recherches effectuées par M. LE CAM ont ouvert là une voie très féconde. En gros, il s'agit simplement d'exprimer sous forme mathématique les hypothèses des méthodes d'hydrogramme unitaire : on dira que le débit dérive de la pluie par un opérateur linéaire :

$$x(t) = \int_{-\infty}^t k(t-\tau) y(\tau) d\tau$$

où y représente la pluie et x le débit.

M. LE CAM a pu vérifier, au moins dans quelques cas, que l'approximation obtenue est bonne. On peut d'ailleurs introduire des opérateurs plus généraux, mais les calculs sont plus complexes.

Il a joint à ce schéma de passage pluies-débits des hypothèses extrêmement satisfaisantes concernant la loi de répartition des averses. Ces hy-

pothèses, dont les idées essentielles sont dues à M. HALPHEN, constituent, avec un nombre de paramètres relativement faible, un schéma d'une grande souplesse, qualité qui s'avère ici indispensable (comme le montrent les recherches de M. MINEUR, par exemple) (1). De ces deux schémas, représentant la distribution des pluies et le passage pluies-débits, il est possible de déduire la répartition des débits par des calculs purement mathématiques. Et nous signalerons un point qui mérite quelque intérêt : c'est qu'on obtient ainsi, pour la forme analytique des lois de probabilité des débits, certains types coïncidant avec les lois proposées par M. HALPHEN, dont la forme avait été fixée au simple vu des débits. Sans tomber dans le travers consistant à dire que cela donne une justification théorique à nos lois (qui seraient alors « les vraies lois »), nous voyons là au moins une coïncidence heureuse.

On conçoit qu'en prenant pour base le schéma dont nous venons de donner une rapide ébauche, il soit possible d'aborder le problème de l'estimation d'une crue en combinant logiquement les renseignements valables qu'on peut posséder sur les pluies, sur les débits, et aussi sur les propriétés hydrauliques, topographiques, etc., du bassin, qui interviennent dans la fixation des constantes de l'opérateur de passage pluie-débit. On peut faire par là la synthèse d'une classe assez large de méthodes.

(1) MINEUR : Etude numérique de la chaîne des jours secs et humides au Parc-Saint-Maur : « Il apparaît... que la chaîne... est au moins triple et sans doute d'ordre pratiquement infini. »

VI. — LA NOTION DE PROBABILITÉ EN HYDROLOGIE

INFORMATIONS N'ENTRANT PAS DANS LE SCHÉMA PRÉCÉDENT

Pourtant, le schéma élargi dont nous venons de parler, qui constitue un progrès énorme par rapport aux solutions partielles envisagées jusqu'ici — et dont nous espérons que ses développements ultérieurs pourront donner des résultats fort remarquables — ce schéma ne semble tout de même pas pouvoir intégrer *toutes les informations valables* qu'on peut avoir sur une crue. Nous allons examiner quelques catégories de renseignements qui n'entreraient qu'avec peine, ou pas du tout, dans ce schéma.

a) L'existence d'événements extraordinaires, jamais encore observés, mais réputés possibles.

On peut concevoir par exemple deux bassins de situations fort différentes, sur lesquels les crues moyennes et extrêmes observées seraient tout à fait comparables; mais il se peut que sur l'un d'eux seulement soit possible un certain phénomène, résultant d'un concours de circonstances atmosphériques, et donnant naissance à des débits cataclysmiques. Ce même phénomène pourrait être matériellement exclu sur l'autre bassin.

Nous avons appelé cela « problème du déluge ». C'est cette éventualité qu'exprime M. PARDÉ d'une façon assez frappante en disant : « Est-on sûr que les possibilités de tous les cours d'eau, en ce qui concerne les grandes inondations, sont intégrées et inscrites, incorporées

comme sont semés des germes, dans les parties basses, expérimentales des courbes? »

Une façon plus mathématique d'exprimer la même idée consiste à dire que des distributions de fréquence ayant le même comportement semi-asymptotique, n'auront pas *ipso-facto* le même comportement asymptotique, (c'est-à-dire pour des valeurs plus éloignées de la région observée). Sous cette forme, on voit que le problème envisagé devrait avoir des répercussions sur le choix du type de loi de probabilité utilisé. Or, en pratique, on constate souvent que lorsqu'on possède des informations du genre de celles auxquelles nous faisons allusion ici, on en fait d'abord abstraction pour traiter le problème statistique — quitte à dire : ces informations seront tout de même prises en compte au moment de la décision, mais d'une façon extra-statistique. Nous verrons tout à l'heure que cette attitude est liée à l'interprétation philosophique de la notion de probabilité, et que ce n'est peut-être pas la plus souhaitable.

b) Une autre catégorie d'informations qu'on peut avoir parfois à envisager concerne l'évolution du climat. Il semble que pour les géographes comme M. PARDÉ, la possibilité d'une telle évolution ne fasse guère de doute. — Tout particulièrement, remarque M. PARDÉ, à l'échelle de longues suites des millénaires qui seraient nécessaires pour rendre valides, selon certains auteurs, les conclusions obtenues par le calcul des probabilités concernant les crues extraordinaires. On peut penser que, dans certains bassins, une évolution du climat local à plus courte échéance peut être prévue, résultant non pas de phénomènes naturels, mais de phénomènes humains (déboisement, déplacement des alpages, migrations, développement des cultures, etc...). Cette évolution, qu'elle soit d'origine naturelle ou humaine, pourra dans certains cas apporter des informations non négligeables sur les crues de l'avenir.

De toute façon, voilà deux catégories d'informations qui nous semblent pouvoir être valables au moins dans certains cas. Or, il ne semble pas que ce genre d'information puisse entrer dans les schémas probabilistes tels qu'on les envisage la plupart du temps : pour le plus grand nombre des hydrologues, en effet, la probabilité d'un débit exprime sa fréquence approximative d'apparition sur une très longue suite d'années — et comment introduire la fréquence de phénomènes jamais observés, mais seulement réputés plus ou moins possibles?

Il y a autre chose : dans l'esprit que nous venons d'indiquer, une crue millénaire est définie comme la crue devant apparaître en moyenne une fois en mille ans. L'expression « en moyenne » sous-entend qu'on devra considérer une longue suite de millénaires pour vérifier

approximativement la théorie. Mais alors — outre les changements de climats dont nous avons déjà parlé — que doit-on penser de l'application de cette théorie à un barrage dont la durée de vie sera peut-être de deux ou trois siècles? Il y a là un hiatus évident qui a été fort bien vu par M. PARDÉ; cela lui a donné l'occasion d'émettre une critique à la fois ironique et judicieuse des méthodes probabilistes ainsi conçues.

Nous venons de mettre en lumière un certain nombre de difficultés graves. Nous croyons qu'on peut les surmonter sans peine, dans le cadre de la statistique. Cela nécessite un élargissement des idées couramment admises. Mais pour en faire bien entendre à la fois la nécessité et la possibilité, nous devons entamer ici une digression sur le sens profond de la notion de probabilité.

CALCUL DES PROBABILITÉS ET STATISTIQUES

Tout d'abord, il nous paraît indispensable de bien préciser ce qu'est pour nous le calcul des probabilités et ce qu'est la statistique.

Le calcul des probabilités est une branche des mathématiques — nous disons bien « des mathématiques » — et non pas des « mathématiques appliquées », car le calcul des probabilités doit être considéré comme une théorie purement abstraite, comme la géométrie de HILBERT ou la théorie des groupes : on appelle probabilités des êtres mathématiques attachés à des parties d'un ensemble abstrait, et obéissant à certains axiomes dans leurs combinaisons mutuelles. De ces axiomes, on déduira tout ce qu'on peut déduire : là se borne le calcul des probabilités. Pour reprendre une expression de M. HALPHEN, c'est « une construction idéale vide de tout contenu réel ». Maintenant il nous semble que les applications du calcul des probabilités peuvent à peu près se classer en deux grandes catégories : applications physiques, applications statistiques.

Les applications physiques sont caractérisées par le fait suivant : comme dans le cas de n'importe quelle théorie physique, il suffit de vérifier que les observations s'accordent avec la théorie pour pouvoir dire que la théorie est bonne. Il en est ainsi par exemple de la théorie cinétique des gaz. Cela tient à ce que les conséquences observables de la théorie (au moins dans la physique classique) concernent seulement des événements pratiquement certains..

Pour les autres catégories d'applications (et c'est le cas en hydrologie), il n'en va pas de même; ces applications constituent ce que j'appellerai « la statistique ». Aux phénomènes observables sont liées des probabilités quelconques, et on se voit obligé de donner un « contenu

réel » à la notion de probabilité. Rappelons en quelques mots comment se sont présentées historiquement les divergences sur ce point.

L'ÉVOLUTION DE LA NOTION DE PROBABILITÉ DEPUIS LAPLACE

Comme PASCAL, pour qui le mot « probable » s'appliquait à toutes les incertitudes, depuis le problème des dés posé par le Chevalier DE MÉRÉ jusqu'à l'incertitude de l'existence de Dieu dans le célèbre pari, il semble que LAPLACE, puis GAUSS et ses contemporains, aient conçu le champ d'application du calcul des probabilités comme extrêmement large : je rappelle par exemple les applications qu'a tentées LAPLACE aux témoignages et aux décisions de la justice. Pour lui, toute proposition incertaine entre dans ce champ d'application.

Déjà, POINCARÉ dessine un abandon de cette position : témoin la préface de son *Calcul des Probabilités* sur les lois du hasard : car le concept de « hasard » est sans conteste beaucoup plus particulier que celui d'« incertitude ». Tout ce qui est au hasard est incertain, mais la réciproque n'est pas vraie : je ne crois pas qu'on puisse dire en aucun sens que le débarquement de Jules César en Angleterre soit « au hasard ».

Après POINCARÉ, et surtout depuis quelques dizaines d'années, les mathématiciens ont senti le besoin d'assurer mieux les fondements de la notion de probabilité : je souligne que cette tendance n'est pas un simple désir de philosophes, mais s'est imposée avec force dans quelques problèmes statistiques, à commencer par le problème de l'estimation.

Ces recherches ont abouti à scinder les théoriciens en deux grandes catégories : on les appelle parfois subjectivistes et objectivistes, mais ces termes sont peut-être mal choisis ; je les nommerai intuitionnistes et empiristes (ou « fréquentistes », suivant l'expression des Anglais). Bien entendu, pour ces deux écoles, le calcul des probabilités est identique, d'après ce que nous avons dit tout à l'heure — les divergences résident dans le contenu concret donné à la notion de probabilité — ou, suivant l'expression consacrée, dans la *théorie de la probabilité*. Pour les empiristes, ce contenu concret se rattache à la notion de hasard, pour les intuitionnistes, à l'idée beaucoup plus générale d'incertitude. Notons que le hasard est en réalité un schéma construit par notre esprit ; ce schéma est conforme aux fameuses « lois du hasard » — on admet, après l'échec de Von MISES (théorie du collectif), que cette notion de hasard doit être prise comme idée première : le hasard ne peut pas se ramener au certain. En tout cas, dans tout phénomène

« au hasard », on peut réaliser ou concevoir une suite d'épreuves, et les fréquences constatées pour les diverses réalisations tendent pratiquement vers des limites (loi des grands nombres). Pour les empiristes, la limite de fréquence est la seule interprétation valable de la probabilité. On trouvera un exposé cohérent de ce point de vue (si l'on excepte la théorie du collectif) dans l'ouvrage de Von MISES : *Probability, Statistik und Wahrheit*.

Je crois qu'il est assez évident que la notion d'incertain est beaucoup plus générale. Pour y rattacher la probabilité, il suffit d'admettre — ce qui est assez intuitif — que les « degrés de croyance rationnelle », que nous pouvons avoir vis-à-vis de propositions incertaines, se combinent entre eux d'une façon dont le calcul des probabilités donne une bonne image. Je ne développerai pas davantage ce point, auquel est consacré l'ouvrage assez ancien (malheureusement aussi assez méconnu) de John MAYNARD-KEYNES : *A treatise on Probability*, ou encore le mémoire beaucoup plus récent (puisqu'il doit paraître seulement dans les prochains mois) de M. HALPHEN sur « La notion de vraisemblance. — Essais sur les fondements du calcul des probabilités et de la statistique mathématique ».

VRAISEMBLANCE ET FRÉQUENCE ÉTAT ACTUEL DE LA CONTROVERSE

Au terme de l'évolution des idées dont nous venons de donner seulement une vue très partielle, on se trouve donc devant deux possibilités, quant au contenu réel à donner à la notion de probabilité, que nous désignerons par « fréquence » et « vraisemblance ». En réalité, le concept de « vraisemblance » nous semble infiniment plus général. Mais, dans la pratique, un très grand nombre de statisticiens, particulièrement parmi les Anglo-Saxons qui ont, peut-on dire, créé la statistique, ont travaillé dans la perspective empiriste, ou « fréquentiste ». On peut se demander pourquoi, et le statisticien anglais BARNARD en donne une explication aussi sensée qu'amusante : « C'est un sujet de méditation, dit-il, de chercher pourquoi les probabilistes, depuis LAPLACE, ont employé les probabilités (au sens de fréquence) plutôt qu'une notion plus générale. Cela est dû à un caractère très général de la pensée scientifique du XIX^e siècle, qui conduisait les savants à se croire capables de concevoir l'ensemble de toutes les possibilités universelles, ou cela est peut-être dû aux habitudes sédentaires des mathématiciens, qui les conduisent à s'intéresser aux jeux de cartes et d'intérieur, lesquels peuvent habituellement être menés jusqu'à une conclusion définie, plutôt qu'aux

sports de plein air comme les courses de chevaux, dans lesquelles les intempéries peuvent empêcher toute issue envisagée d'avance? »

J'ajouterai que les problèmes hydrologiques me semblent se classer plutôt avec les courses de chevaux qu'avec les jeux de cartes.

Quoi qu'il en soit, on doit constater :

- 1° Que la controverse est loin d'être close parmi les statisticiens les plus éminents;
- 2° Que c'est dans l'esprit « empiriste » qu'a été élaborée en majeure partie la technique statistique : théorie des intervalles de confiance et théories des tests de NEYMAN et PEARSON. Ces théories conviennent d'ailleurs parfaitement à certains types de problèmes, tels que ceux que pose le contrôle des fabrications. Parmi les intuitionnistes, les travaux de JEFFREYS ne semblent pas, et de loin, aussi convaincants. Seul le problème de l'estimation semble bien résolu par la formule de BAYES, comme l'a montré M. HALPHEN dans le mémoire que nous avons cité. Quant à FISHER, il occupe une position assez ambiguë entre les deux écoles;
- 3° Cette prédominance des empiristes dans l'évolution de la technique statistique semble avoir marqué profondément la plupart des hydrologues. On voit mal, d'ailleurs, comment il en aurait pu être autrement.

Peut-être me pardonnera-t-on un peu maintenant la longue digression que je viens de faire en dehors de l'hydrologie, si j'ai réussi à montrer que la statistique, conçue dans l'esprit plus large que j'ai appelé intuitionniste, balaie sans peine — au moins théoriquement — toutes les objections que j'ai signalées. Si l'on admet que la statistique est la science des décisions rationnelles à partir d'informations incertaines, on doit pouvoir y intégrer, comme vraisemblances, les diverses informations dont nous avons vu qu'elles ne pouvaient entrer dans un schéma « fréquentiste ».

LE PROBLÈME DES CRUES

Il me reste à préciser un peu comment concevoir le problème des crues dans cet esprit : si nous décidons aujourd'hui de construire un barrage dont la durée de vie semble devoir être disons de trois siècles, qu'est-ce qui nous intéresse au point de vue des crues? Est-ce la crue qui doit être atteinte ou dépassée K fois en moyenne sur une durée de K millénaires, comme l'assurent les fréquentistes? Nous croyons plutôt que la seule crue qui nous intéresse est la crue maximum qui se produira effectivement durant les trois siècles à venir. Cette crue concrète, il est plus ou moins vraisemblable qu'elle atteindra telle ou telle valeur. Et c'est la répartition de cette vraisemblance, de ce « degré de croyance rationnelle », compte tenu de toutes les informations dont nous pouvons disposer, qui constitue en principe l'objet du problème.

On voit bien, dans cet esprit, qu'il n'y a aucune difficulté logique à faire intervenir, pour supputer cette vraisemblance, des éléments tels que l'évolution du climat, ou ce que nous avons appelé le « problème du déluge ».

Cependant, d'après ce que nous avons vu sur l'état actuel de la technique statistique, il est possible qu'on soit amené, même si l'on adopte les vues que nous venons d'exprimer, à employer les techniques existantes. Il faudra sans doute bien des années avant que des techniques intuitionnistes soient assez élaborées pour servir à l'usage des hydrologues. Mais il nous paraît souhaitable de ne pas perdre de vue que ce n'est là qu'un pis-aller.

Ce que nous venons de dire n'a pas la prétention de constituer une œuvre constructive : notre seule ambition était de montrer comment une certaine conception de la statistique — conception encore dans l'enfance du point de vue des techniques — permet d'éliminer complètement certaines objections et de constituer une trame logique pour une solution plus satisfaisante du problème.

DISCUSSION

M. le Président signale que les deux premières parties du mémoire (classement des méthodes d'évaluation et philosophie des fondements du calcul des probabilités) sont l'objet d'un examen devant une Commission spéciale, à laquelle il convie tous les membres du Comité Technique intéressés par la question et que seule la troisième partie (application au problème de la Duranee) serait à discuter pour l'instant en séance plénière.

M. MORLAT donne lecture du commentaire ci-après, envoyé par M. PARDÉ :

QUELQUES CONSIDÉRATIONS SUR CERTAINS ASPECTS DU CALCUL DES PROBABILITÉS

Le calcul des probabilités appliqué à la prévision des crues de fréquence très rare, ce qui revient en somme à la prévision des débits maxima les plus forts à craindre se fait d'habitude d'après les phénomènes sans distinction de saison, mais il peut être intéressant de prévoir dans la mesure du possible les phénomènes redou-

tables susceptibles de survenir aux diverses époques de l'année. Cette précaution s'impose particulièrement lorsque les crues menacent de vastes régions cultivées.

On sait que même les très grandes crues de saison froide ne sont pas dangereuses pour l'agriculture tant qu'elles ne comportent pas sur le champ d'inondation de courants susceptibles d'arracher la terre cultivable ou de le couvrir de sable et de gravier infertiles; mais en saison chaude, même les débordements d'eau peu rapide et quasi stagnante détruisent les récoltes, après un ou deux jours de submersion, pour la plupart des plantes cultivées. Voilà pourquoi par exemple, la crue de juillet 1882 forte d'environ 5,50 m sur la Saône à Chalon et à Mâcon contre 6 m et plus pour les très grandes crues récentes et 8,05 m à Mâcon pour octobre-novembre 1840, a été dommageable.

A ce problème correspond le souci que j'ai toujours eu lorsque j'étudiais les rivières de rechercher tous les maxima dépassant telles ou telles hauteurs pour la plus longue période possible, en chaque mois. Mais, bien entendu, si l'évaluation par le calcul des probabilités comporte des incertitudes et des risques d'erreurs pour l'ensemble de l'année, elle devient beaucoup plus aléatoire encore pour les saisons et les mois au cours desquels même les petites crues sont rares; car dans ces cas, la base de l'extrapolation est très imparfaite et la fréquence de ces crues petites et moyennes doit pouvoir différer beaucoup plus, d'un siècle à un autre siècle précédent ou suivant, que cela n'arrive pour les crues de même hauteur, considérées pour l'ensemble de l'année. Et d'autre part, si le fait d'une concentration à peu d'intervalle de grandes crues dont l'intervalle moyen peut être présumé de 100 à 500 ans est susceptible de tromper sur l'extrapolation de la courbe, de semblables concentrations peuvent bien plus encore, me semble-t-il, exposer à des méprises pour les crues de quelques mois donnés.

Par exemple, les crues de saison chaude sur la Saône sont rares. Il semble que deux seulement aient dépassé 6 m à Chalon et à Mâcon en mai depuis plusieurs siècles peut-être. Or, toutes les deux ont eu lieu à quinze jours d'intervalle en 1856. Puis si l'on prend le Rhône à Lyon, il peut certes avoir des crues considérables en tous mois sauf peut-être du 15 mars à la fin avril (et encore l'avenir modifiera-t-il sans doute cette présomption qui ne tient pas assez compte du calcul des probabilités); mais il est curieux que les plus fortes crues d'août bien connues sur le fleuve à Lyon aient eu lieu à un an seulement d'intervalle, à savoir 5,81 m à Pont-Morans en août 1851 et 5,75 m en août 1852. Depuis lors, on n'a pas vu en ce mois plus de 4,80 m ou un peu plus en août 1875; mais en 1852, dix jours avant les 5,75 m cités plus haut, on observa environ 4,70 m et un mois plus tard, une crue aussi forte accompagnée d'un phénomène relativement plus puissant encore sur le Doubs et surtout sur le Rhin jusqu'à Bâle et Strasbourg.

Je signale ces rapprochements dans le temps à la fois pour leur intérêt propre et pour le rôle perturbateur qu'ils peuvent jouer dans le calcul des probabilités. A vrai dire, si l'on avait la certitude que l'extrapolation soit bonne, on pourrait conclure d'après elle que, par exemple, les deux crues d'août 1851 et 1852 survenues à un an d'intervalle correspondent en réalité à un intervalle moyen de 200 ou 500 ans peut-être, sinon plus (contre 20 à 25 ans peut-être pour les mêmes phénomènes considérés dans l'ensemble de l'année). Mais comment être sûrs que la base de la courbe s'applique à 1.000 ans par exemple aussi bien qu'à 50 et que l'extrapolation n'est point susceptible de grosses erreurs? De toute façon, même en formulant ces critiques, je considère que les tentatives d'extrapolation limitées à des mois donnés doivent avoir un intérêt pratique. En tout cas, elles sont un jeu et un stimulant très intéressant pour l'esprit.

Un des aspects de ces extrapolations saisonnières

auquel je songe est le suivant: j'ai jusqu'à présent admis qu'en certaines saisons, à moins de changements climatiques extraordinaires, les très grandes crues sont, non pas d'un intervalle extraordinairement rare, mais positivement impossible. Je continue à croire à cette impossibilité pour certaines rivières et certains mois dans les conditions présentes de climat. Mais pour d'autres rivières l'événement m'a montré que ces impossibilités n'existaient point. Par exemple, sans doute à la suite d'informations géographiques et hydrauliques insuffisantes, j'aurais jugé autrefois tout à fait impossible que la fameuse crue de l'Orba en 1935 ait eu lieu en août. De même je jugeais bien de fortes crues possibles pour le Tarn et la Garonne inférieure en mars, mais j'aurais presque parié qu'une crue aussi extraordinaire d'origine méditerranéenne comme celle de 1930 n'aurait jamais pu dépasser par exemple 8 ou 9 m à Montauban, au lieu de 11,30 qu'elle a atteints. Et d'autre part, je ne connais qu'une forte crue de juillet, celle de 1652 pour le Tarn à Montauban. Même les crues de faible importance en ce mois sont extrêmement rares. Or, d'après les chroniques qui se confirment, les unes par les autres, il semble bien que la crue de juillet 1652 ait été non seulement très forte mais monstrueuse, avec maximum intermédiaire entre les niveaux déjà connus de novembre 1766 et décembre 1772 et celui de mars 1930. Il serait curieux de pouvoir évaluer la fréquence type d'une crue pareille en juillet ou même en juillet-août. *A priori* et « au sentiment », il ne m'étonnerait pas que sa probabilité soit beaucoup plus faible encore que 1/1.000 ou même 1/5.000. Je signale cette anomalie à l'ingéniosité et à la curiosité des probabilistes de maintenant ou des millénaires à venir.

D'autre part, dans un ordre d'idées assez voisin de celui-ci, j'ai déjà signalé entre autres concentrations remarquables dans le temps, celle des crues géantes de l'Inn inférieur en 1598 et 1606 d'une part, puis en 1788 et 1787 d'autre part. J'ajoute qu'en 1786 il y eut en août deux très grandes crues dont l'une formidable et l'autre pas très inférieure; mais la crue de 1787 qui eut pour suite la seconde inondation bien connue du Danube à Vienne est bien moins remarquable par sa hauteur et par son arrivée moins d'un an et demi après une autre du même genre, que par sa date, à savoir la Toussaint. Il est entendu que l'Inn inférieur peut avoir de fortes crues en saison froide, et j'ai découvert, il y a bien longtemps, dans mes bavardages avec le très regretté inspecteur général E. ARMAND, que ces crues étaient très souvent contemporaines de celles du Rhône supérieur et du Rhin à Bâle, « Covariation », selon le terme de M. COUTAGNE, d'une grande importance climatique. Mais, à cette époque, j'aurais peut-être admis que l'Inn à la Toussaint, tous les 500 ou tous les 1.000 ans en moyenne, atteigne 7 ou 8 m, mais jamais 10,50 ou 11 m. Un probabiliste aurait sans doute eu raison contre moi. Mais je persiste à juger possible ou même probable que pour d'autres rivières et d'autres mois il y a des limites supérieures bien plus basses, des possibilités d'extravagance bien plus réduites, quel que soit l'intervalle moyen envisagé. En tout cas, il me semble utile de poser la question.

Et enfin, en voici une autre toujours liée à la concentration dans le temps de certaines crues. Ici, la chose devient beaucoup plus grave, si je puis m'exprimer ainsi. Mon idée est que les fortes crues font beaucoup plus que pouvoir se suivre à des intervalles infiniment plus faibles que les intervalles moyens, au cours de 1.000, 5.000 ou 10.000 ans. Très souvent, par le fait même qu'elles ont eu lieu, il doit y avoir des probabilités plus ou moins fortes pour qu'elles se répètent, soit sur les mêmes rivières, soit dans la même région. Il se produit maintes fois certes des crues absolument isolées dans le temps, mais les successions de phénomènes graves à

quelques semaines d'intervalle sont extrêmement fréquentes et parfois la ressemblance entre les uns et les autres est, pourrait-on dire, presque hallucinante. Je citerai, entre d'innombrables exemples, les très fortes crues méditerranéennes ou alpestres, de mécanisme curieusement semblable, tout au moins en partie, du bas-Rhône en octobre-novembre 1840, en fin octobre 1830 et 1841, vers la Toussaint de 1843 et à la fin de septembre 1842, puis la célèbre série des crues méditerranéennes d'octobre 1907 avec quatre coups de force, particulièrement brutaux en France dont trois donnèrent plus de 6,50 sur le Rhône à Beaucaire (et trois de ces phénomènes sur quatre étaient cévenols). En outre, dans la même période, mais à d'autres dates il y a eu plusieurs petites crues du même genre et une autre formidable du Pô, puis une autre aussi grandiose que l'Ebre. Ou encore, je signalerai les deux crues cévenoles très redoutables du 20 et du 28 septembre 1846 suivies vers les 17 et 18 octobre par une crue moins violente sur les Cévennes mais beaucoup plus forte sur l'ensemble du Bas-Rhône et surtout sur la Loire où elle tourna au désastre, etc... Enfin, trois des six plus grandes crues connues de la Durançe ont eu lieu du 25 octobre au 12 novembre 1886.

Il me paraît évident qu'il serait tout à fait abusif de voir là un rapprochement purement accidentel comme ce qui amène plusieurs catastrophes toutes égales, coup sur coup, comme les deux désastres des avions à Bahrein à deux jours d'intervalle, ou comme l'invasion de votre train, un jour donné, par le même type d'individus énormes, bruyants, remuants, qui s'agitent dans le couloir durant tout le voyage et qui semblent stéréotypés. Il y a certainement des influences météorologiques qui tendent à produire des effets analogues coup sur coup en peu de temps, et lorsque l'atmosphère est ainsi détraquée, viciée, comme par une maladie, la production d'un phénomène grave a des chances d'être suivie par des phénomènes sérieux plus ou moins semblables. Et qui sait si, au fond, il n'y a pas autant de probabilités de pareilles successions que d'un isolement plus ou moins relatif lorsqu'une grande crue vient d'avoir lieu. Je me demande même, mais avec plus de doute, si ces rapprochements n'existent point dans les limites de quelques années et non seulement dans celles de quelques semaines ou de quelques mois. C'est la fréquence de tels rapprochements qui m'inspirent cette pensée. Je me contente de la soumettre aux spécialistes du calcul des probabilités, appliquée à l'Hydrologie.

M. Christian BEAU, ne pouvant assister aux réunions de la Commission spéciale, fait part de quelques-unes des réflexions qu'il a pu faire sur le problème en général, lorsqu'il dirigeait le Service d'Annonce des Crues au Ministère des Travaux Publics :

1° La méthode BACHET (1) pourrait être ajoutée aux divers procédés d'évaluation des crues, car elle se base sur la notion de débit et permet non seulement de déduire avec une précision très satisfaisante l'importance de la montée d'après les hauteurs atteintes à l'amont, mais encore d'intégrer si besoin, dans certains cas, les données pluviométriques et même les prévisions météorologiques du bassin supérieur ou des affluents. Exemple : influence sur le niveau de la Seine à Paris des pluies arrosant le bassin du Grand-Morin. Celles-ci arrivent en 24 h sur Paris. Or, on annonce les niveaux à Paris trois ou quatre jours d'avance avec une précision de quelques centimètres.

2° L'application de la méthode BACHET à certains cours d'eau tropicaux à long parcours tel que le Niger

a même permis de prévoir les crues de ce fleuve en Nigeria six mois à l'avance. De plus l'association à la méthode BACHET d'une covariation de la Haute-Guinée où le Niger a sa source avec un bassin de même latitude situé dans la basse Nigeria, a permis de faire les mêmes prévisions en se basant uniquement sur la climatologie de ce bassin. Malgré l'évaporation qui peut être très importante dans le bassin moyen (région deltaïque du Niger), on arrive, sur le plan pratique, à des prévisions très satisfaisantes. C'est dire toute la souplesse et l'intérêt de la méthode BACHET.

3° On peut par ailleurs envisager, pour un avenir plus ou moins rapproché, l'utilisation de certaines prévisions météorologiques à longue échéance, actuellement à l'étude notamment à Dakar, sur la base de certaines périodicités; l'association de ces prévisions à la méthode BACHET peut permettre d'espérer l'évaluation des crues à longue échéance.

M. le Président remercie M. BEAU et dit tout le bien qu'il pense de la méthode BACHET pour la prévision des crues d'après l'état initial de la rivière et sa montée à l'amont. Il propose à M. BEAU de rester en contact avec M. MORLAT.

En ce qui concerne les prévisions des précipitations à longue échéance, M. SANSON indique, sur la demande de M. le Président, qu'il n'a pas entendu parler de prévisions établies sur des bases scientifiques qui puissent donner avec suffisamment de certitude des indications sur le temps qu'il fera plus d'un mois à l'avance aussi bien en France qu'à l'étranger.

A propos de la note de M. PARDÉ, M. SANSON confirme que les années de grandes précipitations, d'une part, et les années de sécheresse, d'autre part, paraissent souvent se réunir par « paquets » ou périodes. (Exemple : années sèches de 1942 à 1949 inclus, coupées cependant par un semestre très pluvieux en 1944). Il ajoute, sur la demande de M. BARRILLON, qu'il ne connaît pas de « binomages » dans les phénomènes météorologiques autres que les averse; l'étude de ces cas est d'ailleurs rendue difficile par le manque de précision des observations effectuées avant 1870. (Voir cependant la note sur les anomalies du climat parisien du xiii^e au xviii^e siècle parue dans la *Météorologie* de mai-juin 1937.)

M. le Président remarque que les hauteurs de crue du xviii^e siècle citées par M. PARDÉ ont pu être amplifiées par des ponts de débouché insuffisant ou divers obstacles encombrant les rivières tels que moulins, pêcheries, etc.

En ce qui concerne l'application particulière à la Durançe, M. le Président demande à M. MORLAT si les résultats pourront être connus assez tôt pour évaluer les crues au barrage de Serre-Ponçon, dont la construction est prévue dans un délai assez rapide; l'importance de ce barrage qui sera le plus haut d'Europe en matériaux compactés (110 m de hauteur, cuvette de un milliard de m³) et sa nature excluant la possibilité de submersions exigent des évacuateurs de crues largement conditionnés.

M. MORLAT répond que des renseignements déjà appréciables pourront être obtenus au bout d'un petit nombre d'années d'observations : il n'est pas douteux que ces renseignements pourront être d'un certain prix dans le choix de dimensions des évacuateurs de Serre-Ponçon.

M. LUGIEZ ajoute quelques remarques qui seront utiles à M. MORLAT pour l'étude de la Durançe :

1° Outre les pluviomètres de la vallée et celui du Lautaret, il existe une station bien située à Saint-Véran (2.200 m) et aussi un certain nombre de nivopluviomètres totalisateurs.

(1) Voir *Mémoires et Travaux*, n° 2-1948, p. 152

- 2° Anticipant sur le vœu formulé par M. MORLAT, et relatif à la mesure de la couche de neige au sol, le Service de la Production Hydraulique d'E.D.F. possède des mesures faites chaque semaine depuis deux ans en trois postes.
- 3° Il serait souhaitable de répartir les stations pluviométriques sur des régions d'exposition différente, mais il y a à cela une difficulté car les lieux habités sont situés principalement sur les versants ensoleillés.
- 4° Il conviendrait de multiplier les stations de mesure d'insolation, dont l'intérêt n'a certainement pas échappé à M. MORLAT.
- 5° Les hydrogrammes élémentaires dont le tracé préalable est nécessaire pour l'élaboration d'hydrogrammes synthétiques devraient être établis pour des parties de bassin d'orientation différente.

M. le Président remercie M. LUGIEZ.

Sur la demande de M. le Président, M. CROSNIER indique que, pour l'Algérie, les problèmes qui se posent rentrent dans le cadre des exposés qui ont été faits.

M. RADIGUER estime que les études doivent porter sur les causes du phénomène en même temps que sur le phénomène lui-même. L'Energie Electrique du Maroc poursuit actuellement des études sur les types de temps et leur succession chronologique en même temps que sur les débits. Ces études devraient permettre de déterminer s'il existe des variations cycliques des types de temps et si une corrélation peut être établie entre les pluies et les débits.

M. SANSON signale qu'il y a deux services météorologiques au Maroc : le S.M.M.A. (Service Météorologique de la Métropole et de l'Afrique du Nord) et l'Office Scientifique Chérifien, ce dernier s'occupant plutôt des questions de climatologie. La collaboration des deux services est déjà étroite mais un projet à l'étude la rendrait encore plus complète.