Chapitre IV -

ESSAIS SUR UNE COMBINAISON DES DIFFERENTES METHODES

Chacune des méthodes que nous avons citées présente ses avantages et ses inconvénients. L'hydrologue qui estime la crue millénaire sur un bassin déterminé, a intérêt à contrôler les différents calculs les uns par les autres. Toutefois cette comparaison repose en général sur des bases intuitives où l'expérience joue un rôle prépondérant. Nous avons cherché à donner une méthode plus systématique, cependant, le sujet étant très complexe, nos résultats sont tout à fait fragmentaires et appellent d'autres études. Nous ne les citerons donc qu'à titre d'exemple, ce sont les méthodes de raisonnement plutôt que les résultats qui nous paraissent intéressantes.

L'inconvénient des méthodes physiques nous parait être l'impossibilité d'estimer la probabilité de la crue calculée. On pourrait penser que cet inconvénient est faible et pourtant il est indispensable d'avoir une idée, si peu précise soit-elle, de la rareté de la crue.

Si l'on estime une crue d'après une pluie "rare", le degré de rareté de cette précipitation dépend d'une foule de facteurs. Il est assez facile d'estimer la rareté du volume total tombé, déjà plus difficile d'estimer la rareté de sa répartition dans le temps, et encore plus de sa répartition dans l'espace.

Pour simplifier, on pourrait se borner d'abord à un bassin assez petit pour que les pluies (au moins les pluies exceptionnelles) soient uniformément réparties en surface. Nous avons vu que dans ces conditions les Italiens ont essayé de donner une idée de la rareté de la crue en combinant le volume tombé et la durée de la pluie. C'est une méthode grossière que l'on pourrait perfectionner. Si le débit est représentable par une formule linéaire, l'appoint attribuable à une pluie sera

$$x(t) = \int_0^t K(t-\tau)\, y(\tau)\, d\tau$$

et le maximum satisfait à : $\int_0^t H(t-\tau)\, y(\tau)\, d\tau = 0 \quad ; \quad H = K'$

On pourrait donc essayer de classer les pluies par le temps écoulé entre le début de la pluie et l'époque du maximum de débit. Seulement ceci ne suffit pas à déterminer le maximum du débit. Pratiquement, la méthode utilisable serait la suivante : On considère dans une série de relevés pluviométriques les périodes de pluies séparées par un intervalle sec suffisant (quelques jours pour les bassins moyens) et l'on applique à ces pluies la transformation : $\int_0^t K(t-\tau)\, y(\tau)\, d\tau$

...

Le maximum est aisément ~~séparable~~ repérable et l'on ajuste sur lui une loi de probabilité. Ceci donnera une loi pour l'appoint maximum dû à une période de pluie ininterrompue. Il n'est pas certain que ce soit une méthode excellente. Elle présente toutefois un avantage dû au fait que les pluies sur des bassins de climats semblables peuvent être assez aisément comparées. Elle doit par conséquent permettre d'utiliser, pour un bassin sur lequel on a peu de relevés, les renseignements pluviométriques d'autres régions. A ce point de vue ce n'est qu'une systématisation de la méthode déjà citée de "transposition des averses". Le travail de transformation des pluies en débits est assez fastidieux mais peut se faire mécaniquement.

Cette méthode ne présente d'intérêt pratique que si l'appoint d'une série de pluies représente la fraction la plus notable des crues; c'est un cas assez fréquent.

POSSIBILITE DES METHODES PUREMENT STATISTIQUES.

Les procédés que nous avons discutés au Chapitre II sont supposés utiliser seulement les relevés de débits au point considéré et leurs répartitions de fréquence. Il est bien évident que, pour avoir une bonne approximation de la loi des crues d'une rivière, il est permis de faire tout autre chose.

Supposons par exemple que nous ayons des relevés de débits sur bon nombre de rivières; sur chacune d'elles on peut caractériser la courbe de débits classés ou la courbe des crues annuelles par un nombre suffisant de paramètres. Cet ajustement ne visant qu'à une représentation du passé doit être assez souple. Si l'on prend par exemple des paramètres d'une formule analytique (5 ou 10 si besoin est), on pourra alors faire un travail analogue à celui que nous avions entrepris sur les débits mensuels (cf. étude présentée aux Journées de l'Hydraulique en Juin 1949), et dégager soit un type de courbe convenant le mieux dans l'ensemble, soit un type de courbe pour chaque région climatique. Un tel travail est naturellement énorme, et pourtant serait la base indispensable pour un progrès notable des méthodes statistiques.

Toujours dans le même ordre d'idées, ayant caractérisé une courbe expérimentale par quelques paramètres, on pourrait essayer de relier les paramètres en question à d'autres caractéristiques des cours d'eau. Par exemple, si nous caractérisons la courbe des débits classés annuels par le débit le plus fort, le premier centile, les premier et second déciles et la médiane expérimentaux, ces cinq paramètres pourraient être liés à l'aire du bassin, à une ou deux constantes de l'hydrogramme unitaire, à la répartition moyenne des débits pendant l'année, et aux constantes des lois de probabilités des débits mensuels. Ceci ouvre un champ de possibilités très étendu, et quasi totalement inexploré.

....

Dans un ordre d'idées voisin, M. Halphen avait essayé de représenter les crues du Rhin par la somme de deux variables. Si l'on désigne par x le débit maximum d'un mois, et par α le débit moyen du même mois, il se trouve que x est assez bien représenté par $x = \alpha + \alpha^2 y$ où y est une variable indépendante de α. Malheureusement les études de M. Halphen n'ont pas été assez poussées pour arriver à des règles pratiques.

Si nous ne pouvons, à l'heure actuelle, donner des résultats relatifs à ces diverses méthodes, cela tient à plusieurs raisons : D'une part, il est impossible de se plonger dans une telle masse de calculs sans avoir au préalable étudié la question sous toutes ses faces pour éviter les calculs inutiles; d'autre part, même si ce travail préliminaire avait été acquis, les données numériques nous eussent manqué.

REFLEXIONS SUR L'UTILISATION MAXIMUM D'UNE SERIE DE DEBITS.

Les méthodes du Chapitre II sont un peu brutales; si pour une rivière particulière on possède un relevé limnigraphique pendant un certain nombre d'années, il est possible qu'il y ait beaucoup mieux à faire. Nous ne pouvons entrer dans le détail des méthodes qui permettraient d'ajuster sur une telle courbe un schema aléatoire. D'ailleurs, il faut bien l'avouer, elles sont encore en enfance. Une fois un tel schéma ajusté, un mathématicien pourrait calculer la loi du maximum sur une période déterminée. Nous avons déjà cité un calcul d'Epstein, très simple mais peu satisfaisant. Ici encore, la voie est ouverte aux chercheurs. Signalons toutefois que pour un processus de Markoff, cas extrêmement simple, le calcul revient à résoudre une équation différentielle parabolique du second ordre avec des conditions aux limites non classiques.

Il est assez difficile de dire tout ce que l'on peut tirer de la seule série des débits, mais en principe tout renseignement supplémentaire est susceptible d'apporter de l'information et par suite de réduire la marge d'erreurs sur la crue millénaire calculée.

Supposons par exemple que l'on sache que les débits proviennent des pluies par une transformation linéaire, et que nous connaissions l'opérateur de passage, c'est-à-dire l'hydrogramme unitaire. Quelle quantité d'informations nous apporte ce renseignement supplémentaire ? Si nous ne savons absolument rien sur les pluies, l'information est quasi nulle. Il est en effet facile de remarquer que, en général, on peut inverser l'opérateur linéaire en question; de la série des débits, on peut donc passer aux pluies. Si nous ne savons rien sur les pluies, toute forme serait possible pour les débits, mais le moindre renseignement sur les pluies peut être utile. Par exemple, les mathématiciens connaissent les conditions de régularité qu'implique sur le débit

....

le fait que les pluies sont représentables par une fonction de carré sommable. Des raisonnements analogues s'appliqueraient aux cas où l'on ne suppose pas la relation entre les débits et les pluies linéaires. Par exemple nous avons essayé de faire des calculs avec une relation de la forme :

$$x(t) = \int H(t,\tau)\, y(\tau)\, d\tau + \int (K-H)_{t,\tau}\, z(\tau)\, d\tau$$

$$z(t) = \chi \left\{ y(t) - I_0\, e^{-\int k(t,\tau) y(\tau) d\tau + \int k(t,\tau) z(\tau) d\tau} \right\}$$

Quoiqu'il en soit, ce qui précède montre que si l'on veut adjoindre de l'information à celle que fournit la série de débits, le moyen le plus simple est de regarder ce que sont les pluies au point de vue statistique. Il y a quelques années, nous avions proposé pour les précipitations le schéma suivant :

1°/ Le déclenchement d'une averse dans l'intervalle dt peut être considéré comme une impulsion brusque répondant à une loi de Poisson de moyenne $\nu(t)\, dt$

2°/ La quantité de pluie tombée est fixée par un tirage au hasard d'une population de loi $f(\xi)\, d\xi$. Cette quantité s'étale sur une certaine période suivant une formule du type

$$y(t) = \int a(t,\tau)\, d\xi(\tau)$$

3°/ La densité des averses $\nu(t)$ est elle-même une fonction aléatoire, corrélée dans le temps, par exemple du type $\nu(t) = \int k(t,\tau)\, d\gamma(\tau)$ où $\gamma(\tau)$ est une fonction à accroissements indépendants.

Il résulte de calculs sur les pluies à Paris Parc St-Maur que ce schéma est acceptable. Remarquons d'ailleurs qu'il est extrêmement souple.

En supposant vérifiées certaines conditions de régularité sur les accroissements $d\gamma(\tau)$ on peut écrire la fonction caractéristique de la pluie sous la forme :

$$\varphi_y(u) = \int A(t)\, \varpi \left\{ \sigma \left[-i\, \omega(\Omega_1(u)) \right] \right\} dt$$

avec
$$y(t) = \int a(t,\tau)\, d\xi(\tau) = \Omega_1^*(\xi)$$

$$\nu(t) = \int k(t,\tau)\, d\gamma(\tau) = \sigma^*(\gamma)$$

$A(t) =$ moyenne des $d\gamma(\tau)$

$1 + \varpi(u) =$ f. c. des $d\gamma(\tau)$ non nuls

$1 + \omega(u) =$ f. c. des pluies non nulles

Si la relation entre les pluies et les débits s'exprime par l'hydrogramme unitaire

$$x(t) = \int K(t,\tau)\, y(\tau)\, d\tau = \Omega_2^*(y)$$

....

on en déduit immédiatement la $f.c.$ des débits :

$$\varphi_x(\theta) = \varphi_y\left[\Omega_2(\theta)\right]$$

Si l'on effectue des calculs numériques basés sur ces formules, on peut s'attendre à obtenir un gain d'information sur la crue millénaire. Ce gain de précision est dû, non pas au fait que l'on a introduit explicitement les pluies dans le calcul, mais seulement au fait que l'on a admis que les pluies satisfaisaient au schéma précité.

Naturellement un calcul complet issu de ces formules est assez compliqué. Nous allons citer seulement quelques résultats issus d'approximations.

Tout d'abord les deux opérateurs Ω_1 et Ω_2 se combinent dans la formule. Nous supposerons que ceci est déjà fait et noterons $\Omega_1 . \Omega_2 = (\Omega_2^* \Omega_1^*)^* = \Omega$

Si
$$\begin{cases} \varpi = i\,\alpha_1 s + \frac{i^2}{2}\alpha_2 s^2 + \cdots \\ \omega = i\,a_1 s + \frac{i^2}{2} a_2 s^2 + \cdots \end{cases}$$

On obtient par exemple (avec $A(t) = cte$ pour simplifier encore)

moyenne du débit $m = A\alpha_1 a_1$

variance du débit $\mu_2 = A\left\{\alpha_1 a_2 K_2 + \alpha_2 a_1^2 \int \tilde{K}(\ell)\,\tilde{h}(\ell)\,d\ell\right.$

où $\tilde{f}(x) = \int f(u)\, f(u+x)\, du \qquad K_2 = \int K^2(u)\, du$

$\tilde{h}(\ell)$ représente la covariance des pluviosités

La covariance de deux débits distants de θ serait

$$A\left\{\alpha_1 a_2 \tilde{K}(\theta) + \alpha_2 a_1^2 \int \tilde{K}(\theta-\varphi)\,\tilde{h}(\varphi)\,d\varphi\right.$$

On voit ainsi que les coefficients statistiques les plus simples susceptibles de préciser la courbe de répartition des débits dépendent de façon complexe des propriétés du bassin et des pluies.

Pour des bassins tels que l'hydrogramme unitaire de l'un se déduise par affinité de celui de l'autre ($K(x) \to \lambda K(\lambda x)$) la variance μ_2 du débit sera en général moins variable avec λ que λ lui-même, c'est-à-dire que des formules du type :

$$v_2 = \lambda^\beta v_1 \qquad \beta < 1$$

ont des chances de convenir.

Ces diverses formules pourraient s'expliciter, leur intérêt dépend beaucoup des études que l'on fera sur les pluies.

.....

Pour arriver à des résultats plus maniables et cependant assez approchés, nous allons faire encore une autre hypothèse. Mais cette fois les formules ne devront être considérées que comme un guide dans le choix de représentations empiriques. Nous allons d'abord préciser un peu le but d'une telle méthode. Si l'on veut prévoir une valeur pour une crue de probabilité 10^{-3} par exemple, l'outil définitif de travail sera la loi de probabilité du débit. Cette loi est très imparfaitement connue; aussi supposerons-nous qu'on en a une approximation valable par une expression analytique d'un type cité au chapitre II. L'essentiel est alors de fixer au mieux les constantes d'une telle loi. Ces constantes dépendent des caractéristiques du bassin et de celles de la pluie; ce que nous allons faire est précisément de donner des expressions de telles constantes où les caractéristiques précitées entrent de façon raisonnable. Les formules ne seront donc pas exactes mais seulement qualitativement acceptables.

Pour cela, nous supposerons seulement que les pluies sont indépendantes. Dans ces conditions ν représentant le nombre moyen d'averses, et les a_j les moments (par rapport à l'origine) des pluies non nulles, les cumulents de la loi du débit moyen sur une période de longueur T quelconque seront :

$$\kappa_j = \nu\, a_j\, S_j$$

où

$$S_{Tj} = \int S_T^j(t)\, dt$$

$$S_T(t) = \begin{cases} \frac{1}{T}\int_{-t}^{T-t} K(u)\, du & \text{si } t < 0 \\ \frac{1}{T}\int_{0}^{T-t} K(u)\, du & \text{si } 0 < t < T \\ 0 & \text{si } T < t \end{cases}$$

$S_T(t)$ est une fonction calculable à partir de l'hydrogramme unitaire, et celui-ci peut être évalué par exemple suivant la méthode de Clark :

$$K(u) = \int_0^u e^{-\frac{u-s}{A}}\, I(s)\, ds \qquad \text{(cf. chap. III)}$$

Quant aux νa_j ce sont simplement les cumulants de la pluie tombant dans l'unité de temps.

En particulier cette formule nous permet de passer des constantes relatives aux débits sur une période T à celles d'une période T' :

$$\kappa_{T'j} = \kappa_{Tj}\; S_{T'j}/S_{Tj}$$

et plus spécialement des constantes des débits journaliers à celles des débits instantanés.

Pour donner encore un exemple d'application de telles formules, examinons l'effet d'un changement d'échelle sur l'hydrogramme.

....

Soit un hydrogramme de la forme $\lambda k(\lambda t)$ où λ est un paramètre aléatoire de loi $f(\lambda)\,d\lambda$. Le $j^{ième}$ cumulant du débit instantané s'écrira :

$$\kappa_j = E\left\{\nu a_j \int \lambda^j K^j(\lambda t)\,dt\right\}$$

soit
$$\kappa_j = \nu a_j \, K_j \, E(\lambda^{j-1})$$

En particulier, le coefficient de variation du débit instantané s'écrit

$$CV_x^2 = \frac{a_2}{\nu a_1} K_2 \bar{\lambda}$$

$(CV)^2$ est donc :

1/ Proportionnel au $(CV)^2$ des pluies sur l'unité de temps

2/ Proportionnel à $K_2 = \int K^2(u)\,du$ constante dépendant de la forme du bassin

3/ Proportionnel à la valeur moyenne de $\lambda = \frac{1}{\theta}$ où θ est un temps caractéristique de l'écoulement.

De plus $\zeta = \frac{CS}{CV} = \frac{a_1 a_3}{a_2^2} \frac{K_3}{K_2^2} \frac{\overline{\lambda^2}}{\bar{\lambda}^2}$ représente la dissymétrie relative d'une loi. Les débits sont donc d'autant plus dissymétriques que les temps de parcours sont plus dispersés.

Dans le Chapitre III, nous avons cité certaines formules (Burkli-Ziégler par exemple) qui admettent que le temps de parcours est proportionnel à $\sqrt[4]{A}$ A étant l'aire du bassin. Ceci dérive d'ailleurs de la formule de Manning. On pourrait probablement utiliser une formule analogue ici.

D'après les expressions données par M.M. Bernard, Jarvis Clark et ses successeurs, le paramètre important caractérisant le bassin serait plutôt : $\frac{L}{\sqrt{s}}$ où L et s sont respectivement la longueur et la pente du bassin. Il est impossible actuellement de donner un résultat certain sur cette question.

Quant à la variation du coefficient de variation des pluies avec l'aire du bassin, les études que nous connaissons ou avons pu faire, n'en donnent qu'une idée très vague. Certaines expressions d'usage courant (T.E.W. Schuman) font penser que cette variation serait du type :

$$CV_A^2 = \frac{CV_0^2}{\left(1 + \frac{1}{10}\sqrt[3]{A}\right)^2}$$

Mais nous ne pouvons citer cette formule qu'à titre d'indication.

.....

Effet de la non linéarité du passage pluie-débit -

Il est assez difficile d'examiner l'hypothèse de non linéarité de l'opération de passage pluie-débit. Cette non linéarité est quasi certaine théoriquement, mais son effet pratique est assez limité. Voici un calcul qui donne une idée de l'ordre de grandeur du phénomène :

$$\text{Soit} \quad x = \int_0^\infty \xi \, K(\xi \tau) \, du(\tau)$$

supposons ξ lié à du et $\int \alpha K(\alpha \tau) \, d\tau = 1$

Par un choix convenable de la liaison entre ξ et du, on peut rendre l'hydrogramme d'autant plus pointu que du est plus grand, et l'on peut écrire :

$$\bar{x} = \gamma \alpha_1$$

$$\operatorname{var} x = \gamma K_2 \; E(\xi u^2)$$

En particulier, si $\xi = \alpha \, du + \beta$ où β est une variable aléatoire indépendante de u :

$$\bar{x} = \gamma \alpha_1 .$$

$$\operatorname{var} x = \gamma K_2 \left(\alpha \alpha_3 + \alpha_2 \bar{\beta} \right)$$

La pointe de l'hydrogramme réduit étant égale à ξK_m a pour moyenne $K_m (\alpha \alpha_1 + \bar{\beta})$ et variance $K_m^2 \{ \alpha^2 \operatorname{var} u + \operatorname{var} \beta \}$

Utilisant ces résultats sous forme brutale pour la station de Lamtetie avec les valeurs :
correlation $(\xi K_m, u) = .20$ $\quad CV_\xi = .25$ $\quad CV_u = .66$

on trouve que $\dfrac{\bar{\beta}}{\alpha \alpha_1}$ est voisin de 13, ce qui augmente le coefficient de variation de x de 10 % environ.

Mais, comme nous l'avons dit, cette application a été faite de façon brutale et assez grossière, en particulier sans tenir compte de façon suffisante de la répartition des pluies. Un calcul plus correct permet d'abaisser le pourcentage d'erreur à environ 5 à 6 %. Cet effet n'est donc pas totalement négligeable; toutefois, en première approximation, on peut ne pas en tenir compte.

Un calcul de cette nature nous fournit donc deux ou trois paramètres de la courbe de probabilité du débit. Si l'on connaît une forme analytique s'appliquant assez exactement sur les lois des débits, il suffira alors de transporter les constantes calculées dans cette expression pour savoir, par exemple, comment le débit millénaire varie avec les caractéristiques du bassin. On doit obtenir ainsi des formules analogues à celles que nous avons

....

citées au début du chapitre III. L'intérêt du calcul précédent est la détermination d'une forme analytique convenable.

Si nous supposons que la loi est une loi de Galton et que l'on utilise simplement la moyenne et le coefficient de variation, on peut écrire :

$$\frac{x}{m} = \frac{1}{\sqrt{1+c}}\; e^{k\sqrt{\log(1+c)}}$$

Or, nous avons vu que très approximativement :

$$c = \frac{\gamma K_2}{(1 + \sqrt[3]{A})^2}$$

où γ représente le CV^2 des pluies journalières à une station du bassin et A est exprimé en milliers de km^2.

Quoique d'utilisation très simple, cette formule ne représente rien d'intuitif. Si l'on porte en abscisses $\log c$ et en ordonnées $\log \frac{x}{m}$, la courbe obtenue présente un point d'inflexion pour une valeur de c voisine de 1,7. Dans une région assez large, on peut donc la remplacer approximativement par une droite. On trouve simplement pour $0{,}3 < c < 4$ que la courbe est sensiblement égale à $\frac{x}{m} = \beta c^{\alpha}$ où β est un coefficient voisin de 33 pour $k = 4{,}54$ et α est un peu supérieur à l'unité.

Pour d'autres formes analytiques, par exemple la loi P_3 ou ce qui est plus raisonnable la loi A_0 (harmonique), l'exposant α serait un peu plus faible que 1. Nous admettrons donc, à titre provisoire, que la crue millénaire peut s'écrire :

$$x = m\beta c = m\beta \frac{\gamma K_2}{(1+\sqrt[3]{A})^2}$$

Si l'on suppose en outre que K_2 est proportionnel à $A^{-\frac{1}{4}}$ comme nous l'avons fait au chapitre III, on obtient

$$x \simeq \frac{A^{3/4}}{(1+\sqrt[3]{A})^2}$$

Pour montrer combien des formules analytiques différentes peuvent être peu éloignées en pratique, on pourrait comparer ceci à l'enveloppe de Creager : $y = A^{.936\,A^{-.048}}$

On s'apercevra aisément que, dans un domaine très étendu (au moins de 1 km^2 à 100.000 km^2), le coefficient de Creager est presque exactement égal à

$$\left\{ \frac{A^{3/4}}{(1+\sqrt[3]{A})^2} \right\}^{1,1}$$

Tout ceci ne peut actuellement être donné qu'à titre d'indication, la méthode pratique d'utilisation dépendant de la fixation de diverses constantes et formes analytiques que nous

....

ne pouvons donner qu'après les avoir dûment essayées.

Si l'on voulait obtenir une formule assez précise, il serait nécessaire de faire le calcul complet tenant compte de tous les facteurs qui interviennent dans la formation du débit. Nous nous sommes bornés pour l'instant à considérer les époques de l'année où le débit n'est pas trop notablement influencé par l'évaporation. Pour ces époques, les calculs linéaires s'appliquent assez bien, et au moins pour les régions à débits de type pluvial (Massif Central par exemple) ce sont les seuls moments de l'année où se produisent pratiquement les grosses crues. Les développements qui précèdent ne sont donc pas sans intérêt. Des calculs plus exacts sont en cours actuellement.

Remarques sur la précision que l'on pourrait obtenir par de telles méthodes -

Si l'on met à part le fait qu'une théorie convenable doit permettre de fixer assez correctement les formules analytiques qui servent au calcul des crues, on peut se demander quel gain de précision l'utilisation des pluies est susceptible d'apporter.

Prenons une station pluviométrique dont le régime puisse être considéré comme pratiquement stationnaire au cours de l'année, les pluies journalières suivent approximativement une loi de Laplace $\frac{1}{\alpha} e^{-\frac{y}{\alpha}} dy$ et par suite une pluie journalière de probabilité p s'écrit : $y = -\alpha \log p$

Si α est déterminé par l'observation de N années, l'écart type de y serait :

$\sigma_y = \frac{\alpha - \log p}{\sqrt{nN}}$ et la précision relative $\frac{\sigma_y}{y} = \frac{1}{\sqrt{nN}}$

n étant le nombre de points indépendants que représente l'année. Pour les débits n était très faible, au contraire, pour les pluies qui sont beaucoup moins liées n est voisin de 150. Le module de précision d'une "pluie millénaire" calculée sur N années serait donc voisin de $\varpi = \frac{1}{12\sqrt{N}}$ soit pour 30 ans 1,5 %. La pluie millénaire d'un jour est donc connue à environ 5 % près, alors que dans les mêmes conditions, le débit n'était connu qu'à 50 % près. Si l'on employait le procédé dont il a été question au début du chapitre pour calculer l'apport maximum dû aux pluies, comme il y a environ 50 périodes de pluies continues dans l'année, ces périodes peuvent être pratiquement considérées comme indépendantes, on peut penser que l'on gagnerait encore à utiliser les pluies.

....

De façon plus précise, si la loi globale de débit est une loi de Galton dont on détermine les paramètres par les formules citées plus haut en supposant l'hydrogramme connu, le module de précision sur la crue millénaire est environ 1,7 fois plus petit que celui que l'on obtiendrait par la méthode Gibrat. D'après ce que nous avons vu au chapitre II, la crue millénaire serait donc calculée ainsi à environ 20 % près en tenant compte d'une année ou deux de relevés fins et de 30 ans de relevés ordinaires sur les pluies.

Pratiquement, cette précision est une limite supérieure, elle ne pourrait être atteinte que si l'on connaissait les pluies totales sur le bassin pendant les 30 ans.

Nous arrêterons là cette ébauche, nous réservant de la préciser par la suite. Il nous semble préférable en effet de ne pas avancer outre mesure sans avoir établi de solides bases de départ. Nous pensons cependant avoir montré que l'on pouvait tirer parti de ces méthodes de calcul.

Dans tout ce qui précède, nous n'avons parlé que de "pluies". Il est entendu une fois pour toutes que ces "pluies" devaient contenir les fontes de neige. Quoiqu'il y ait intérêt à considérer les deux phénomènes séparément, ceci nous aurait entraîné à évaluer la probabilité de concordance des fontes et pluies, ce que nous ne pouvons faire que d'une façon trop incomplète.

COMPORTEMENT ASYMPTOTIQUE, SEMI-ASYMPTOTIQUE et PROBLEME DU DELUGE

Au cours du chapitre II, nous avons cité un certain nombre de formules analytiques possibles pour représenter les lois de probabilité des crues. Pour les caractériser, nous avons fait usage de leur comportement asymptotique. Cette notion appelle quelques réserves, il est facile de voir que deux lois peuvent avoir des comportements asymptotiques nettement différents sans pour cela être distinctes dans la région où on les utilise. L'hypothèse de base d'une telle représentation est un certain principe de continuité qui a toujours amené les mathématiciens à donner des formules d'un type analytique "civilisé". La portion de courbe qui nous intéresse n'est pas le voisinage immédiat de l'infini mais plutôt le voisinage de valeurs assez grandes, que l'on pourrait appeler semi-asymptotiques. Dans cette région, les courbes diffèrent beaucoup moins, si toutefois leurs paramètres ont été bien choisis. Le gros inconvénient de ce fait est qu'il n'existe guère de façon simple de caractériser ce comportement semi-asymptotique. On pourrait tenter de le représenter par quelques nombres, par exemple : points à $\frac{1}{10}$ $\frac{1}{100}$ $\frac{1}{1000}$ $\frac{1}{10000}$

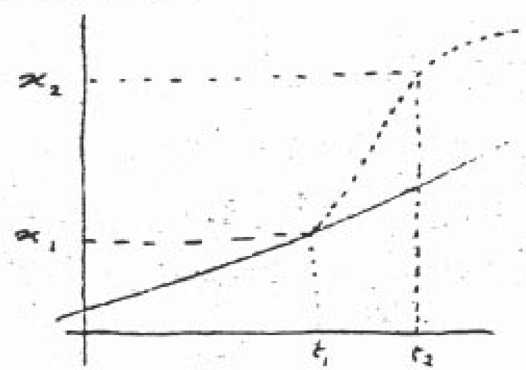
...

Voici par exemple les chiffres que l'on aurait trouvés respectivement pour les lois de Galton, lois harmoniques de même coefficient de variation, la médiane est prise comme unité :

	10 %	1 %	1 ‰	1 °/ooo
Loi de Galton	3,6	10,2	22,0	41,2
Loi Harmonique	4,7	12,2	21,0	30,0

A ce propos, nous voudrions faire quelques remarques sur un problème qui est tout à fait lié au précédent. Certains auteurs américains (cf. Creager) ont prétendu que les méthodes statistiques étaient vouées à l'échec parce qu'on ne pouvait trouver une extrapolation raisonnable de la courbe empirique. Creager par exemple écrit que depuis 1915 environ, après les travaux de Fuller et Hazen, il a été fait aux U.S.A. un nombre considérable de calculs par la méthode statistique et qu'en 1934-35 il s'est produit des crues dont la probabilité calculée par les méthodes statistiques serait de l'ordre de 10^{-6}

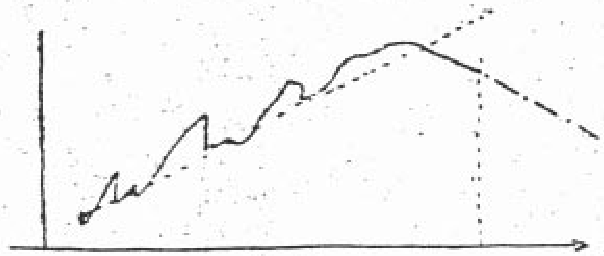
Le phénomène mis en cause est très facilement visible sur une représentation en coordonnées du type Gumbel. Soit t_1 l'abscisse correspondant au point expérimental le plus élevé, si la série d'observations est 100 points, t_1 correspond le plus souvent à une probabilité inférieure à $1 - \frac{1}{500}$; soit t_2 le point correspondant à $\frac{1}{1000}$, la courbe expérimentale prolongée par une droite donne une valeur x_1 pour le débit, alors que la courbe vraie pourrait être la courbe en pointillé correspondant à une crue beaucoup plus élevée :



Lorsque l'on construit une bande de confiance autour de la courbe expérimentale, on se rend compte de l'arbitraire de cette extrapolation. Cependant l'argument de Creager se détruit lui-même. En effet quelle que soit la valeur de la crue correspondant à une probabilité $\frac{1}{1000}$, le nombre moyen de crues dépassant cette valeur sera toujours $\frac{1}{1000}$; si donc on a observé, comme l'affirme cet auteur, de très nombreuses crues dépassant $\frac{1}{1000}$, c'est que la probabilité de ces crues avait été prise

....

trop faible. Or malgré la corrélation existant entre les différentes rivières, il est permis de penser que si la méthode statistique avait été appliquée correctement, on aurait dû voir peu de crues dépassent la valeur admise. Ce qui s'est produit pour les auteurs américains est un phénomène bien connu du statisticien : voulant représenter le plus exactement possible une courbe expérimentale, on l'a ajusté de trop près. Autrement dit, le nombre de degrés de liberté des courbes ajustées était trop grand, ce qui les rendait impropres à la prévision. Pour un exposé clair de la question, on pourra se rapporter à l'article de M. Halphen dans l'Annuaire Hydrologique de la France 1945. Voici un exemple qui fera peut-être comprendre le phénomène : soit une courbe dont l'allure est celle figurée ci-dessous



Si l'on veut extrapoler une telle courbe, on peut la représenter par une suite de polynômes, mais si le nombre des polynômes est trop grand, on sera amené à prolonger suivant le trait mixte au lieu du trait pointillé. Il s'est passé pour les auteurs américains un phénomène tout à fait analogue.

Comment éviter pratiquement cette difficulté ? Le seul moyen serait d'avoir une représentation de la courbe assez bonne. Il est bien certain que les crues sont bornées supérieurement, par suite l'allure que nous avons marquée en pointillé sur la figure (1) est, en un certain sens, plus vraisemblable que l'allure figurée en plein.

La méthode la plus correcte statistiquement serait d'étudier tous les cours d'eau sur lesquels nous avons des relevés et d'effectuer le travail dont nous parlions au début de ce chapitre. Ce travail est très considérable. Pour utiliser les données connues sur les pluies, on peut procéder différemment. Nous avons montré qu'un relevé de pluies fixe avec plus de précision la région semi-asymptotique qu'un relevé de même durée sur les débits. Il suffit d'effectuer le passage de l'un à l'autre au moyen de l'hydrogramme unitaire pour avoir une idée de la courbe à employer.

Une autre remarque que nous voudrions faire est la suivante : mettre ensemble des débits de lois différentes conduit à une courbe dont le comportement semi-asymptotique est plus lent que celui de chacune des courbes de départ. Par exemple, des lois du type $P_3 - A_0$ pour des débits instantanés pris à une époque fixe de l'année conduiraient à une courbe voisine d'une loi de Galton pour l'ensemble de l'année.

....

De la même façon, l'addition de variables aléatoires indépendantes de moyennes très différentes conduit à des lois de comportement semi-asymptotique plus lent que chacune des lois de départ, quoique la loi tende finalement vers la loi de Gauss.

....

- CONCLUSION -

L'ensemble de ce qui précède donne une vue nécessairement très incomplète de tous les problèmes qui se posent à propos de l'étude des crues. Nous rappellerons ici certains traits caractéristiques de la précision des différentes méthodes. Nous avons vu que :

1°) une méthode statistique ne faisant aucune hypothèse sur la forme analytique de la loi des débits, conduit sur le point millénaire à une précision vraisemblablement de l'ordre de $7/\sqrt{n}$

2°) une méthode statistique utilisant les crues annuelles et une courbe analytique exacte pour la loi de probabilité a une précision voisine de $\frac{1}{\sqrt{n}}$

3°) la même méthode utilisant tous les débits (Gibrat) a une précision voisine de $\frac{0,75}{\sqrt{n}}$

4°) une méthode tenant compte au mieux des pluies sur un bassin pourrait conduire à environ : $\frac{0,45}{\sqrt{n}}$

5°) les méthodesfaisant appel à des pluies exceptionnelles donnent un calcul assez précis de la crue correspondante mais ne peuvent permettre de fixer que d'une façon très large la probabilité correspondante. Grossièrement la pluie la plus exceptionnelle d'une série de n années a une probabilité voisine de : $p = \frac{15}{1000\,n}$ correspondant à une période de recurrence inférieure à $T = 2n$.

Si l'on a fait appel à des pluies sur d'autres bassins, il n'est guère possible de fixer la probabilité correspondante.

Pratiquement, dans l'état actuel des choses, on sera amené à calculer de la façon suivante :

1/ Calculer une crue millénaire par la méthode Gibrat.

2/ La comparer avec les crues qu'auraient données les pluies maxima observées sur le bassin ou les bassins voisins.

3/ Employer pour se ramener à des bassins connus des formules de réduction du type de celle que nous avons cités :

$$x_A = x_B \left(\frac{1+\sqrt[3]{B}}{1+\sqrt[3]{A}}\right)^2 \frac{B^{1/4}}{A^{1/4}}$$

B et A en milliers de km^2

.....

Ceci ne peut, en tout état de cause que représenter un pis-aller. Pour faire des études plus précises, il sera nécessaire d'entreprendre, d'une part des mesures, d'autre part des études assez longues dont nous citerons seulement les suivantes :

A - Mesures à effectuer sur un bassin :

1°) Mesure à échelle fine sur un ou deux ans des hydrogrammes de crues et des pluies correspondantes. De préférence par enregistrement. Si ce n'est pas possible, par des relevés effectués à des intervalles de temps inférieurs au cinquième du temps de croissance de l'hydrogramme unitaire.

2°) Mesures de temps de parcours de l'eau dans les cours d'eau principaux, par une méthode rapide et grossière telle que celle des "patches" de fluorescéine.

Ces diverses mesures doivent permettre de fixer, avec une bonne approximation, l'opérateur faisant passer des pluies aux débits. Par la même occasion, on pourra regarder l'effet de l'évaporation sur le bassin.

B - Calculs à effectuer sur des données existantes.

1°) Ajustement de lois de probabilités sur les crues des rivières où l'on possède de longues séries d'observations. Recherche des relations entre ces courbes et : les caractères des hydrogrammes, le régime global de la rivière, les lois mensuelles.

2°) Sur les bassins où ce sera possible, calculer jour par jour la pluie totale tombée sur le bassin, chercher les lois auxquelles satisfait cette pluie. Tenir compte aussi des fontes de neige.

3°) Enfin, pour les mathématiciens, recherche de la loi du maximum du débit annuel connaissant les schemas ajustés sur les débits et les pluies.

En ce qui concerne les calculs d'ordre statistique, nous les avons entrepris sur les données en notre possession. Il nous faudrait encore près d'un an pour les mener à bien.

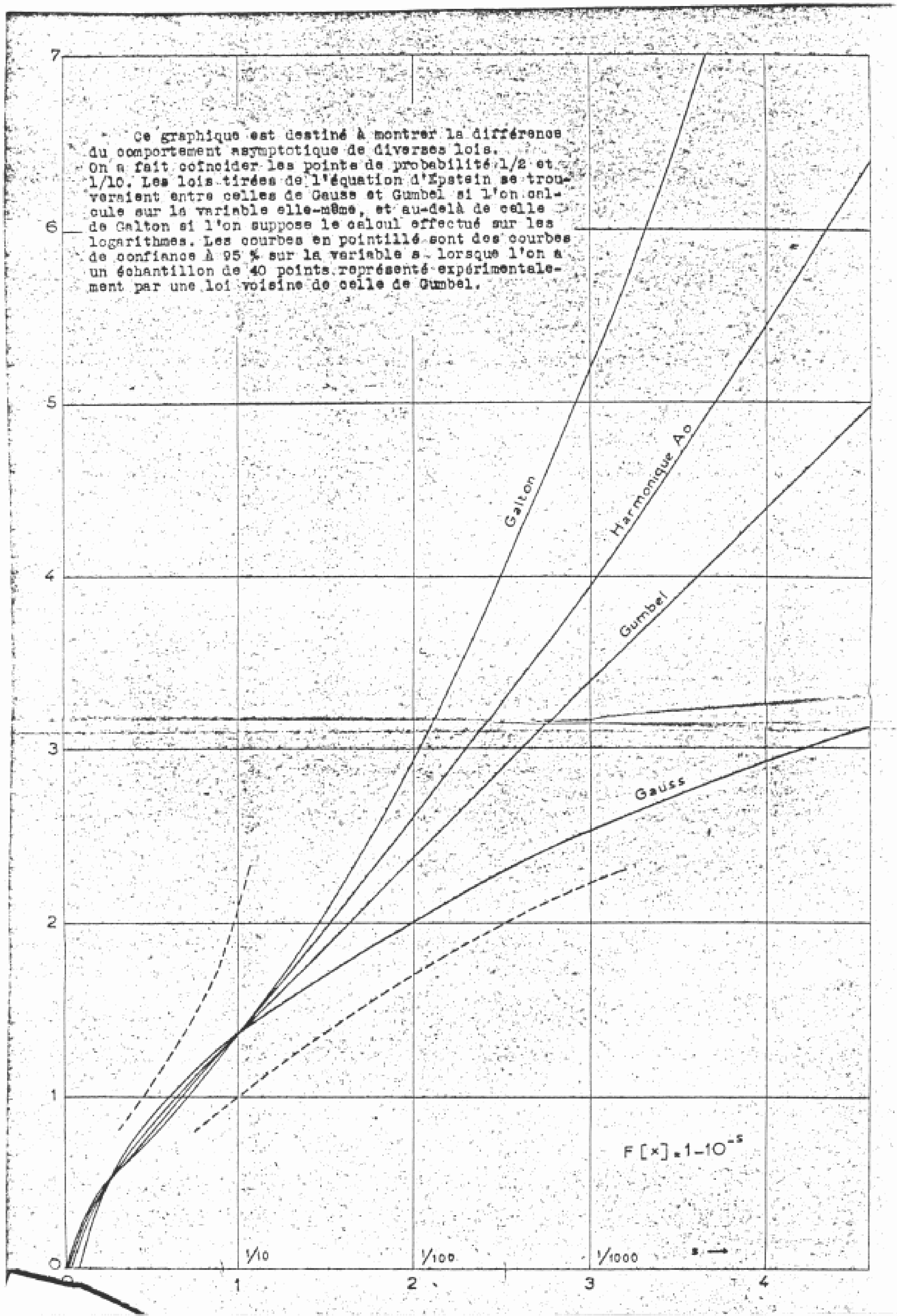
Tout ceci doit permettre d'atteindre une précision voisine de 20 % sur la crue millénaire, mais, en tout état de cause, on obtiendra de cette façon une évaluation homogène des facteurs de crue des différents bassins.

....

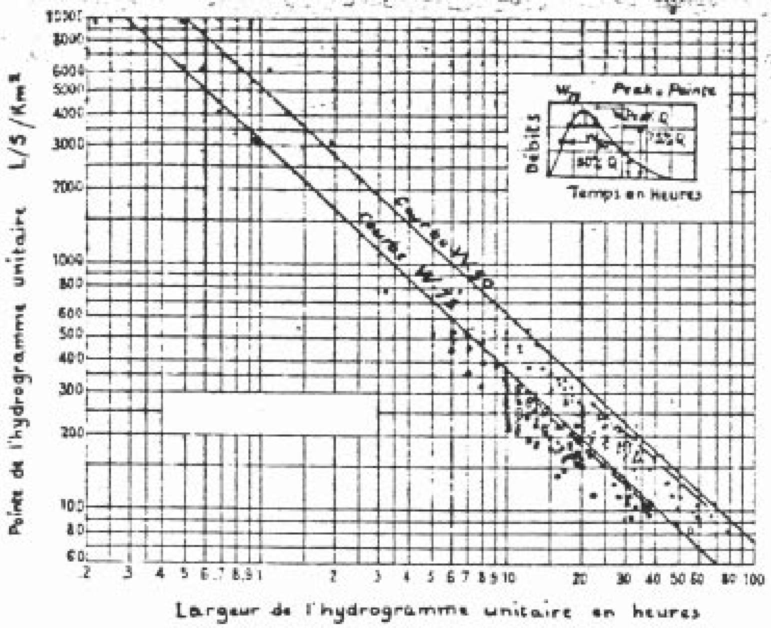
Quoique cet exposé ne vise pas à être complet, il semble nécessaire d'aborder un autre problème, cette fois d'ordre économique. Nous avons parlé d'estimation de crue millénaire; pourquoi prendre 1000 et non pas 100 ou 10.000 ? Le problème ne peut se résoudre qu'économiquement. Les principes directeurs d'une solution sont les suivants : en tout état de cause, admettre une probabilité de crue telle que, selon toute vraisemblance, les ouvrages soient amortis avant d'être démolis; de plus fixer une probabilité telle que, sans trop élever le coût de l'évacuateur, elle conduise à rendre assez petits les risques de dégâts causés par la rupture. Un calcul de cette nature a été effectué par Gibrat pour Sarrans; des auteurs américains ont évalué de la même façon la probabilité qui minimise le coût moyen, c'est-à-dire : espérance mathématique des dégâts + coût de l'ouvrage. Ces divers auteurs ont obtenu des probabilités supérieures à 1/1000 cependant 10^{-3} semble une valeur raisonnable si l'on veut avoir une marge de sécurité notable. On néglige le plus souvent dans ces calculs les dégâts causés à l'aval du barrage.

En tout état de cause, il ne faut pas oublier qu'une crue de probabilité $1-p$ sur une année a une probabilité $P = 1-p^{100}$ de se produire au moins une fois sur une période de 100 ans, soit pour la crue millénaire, P voisin de 10 %.

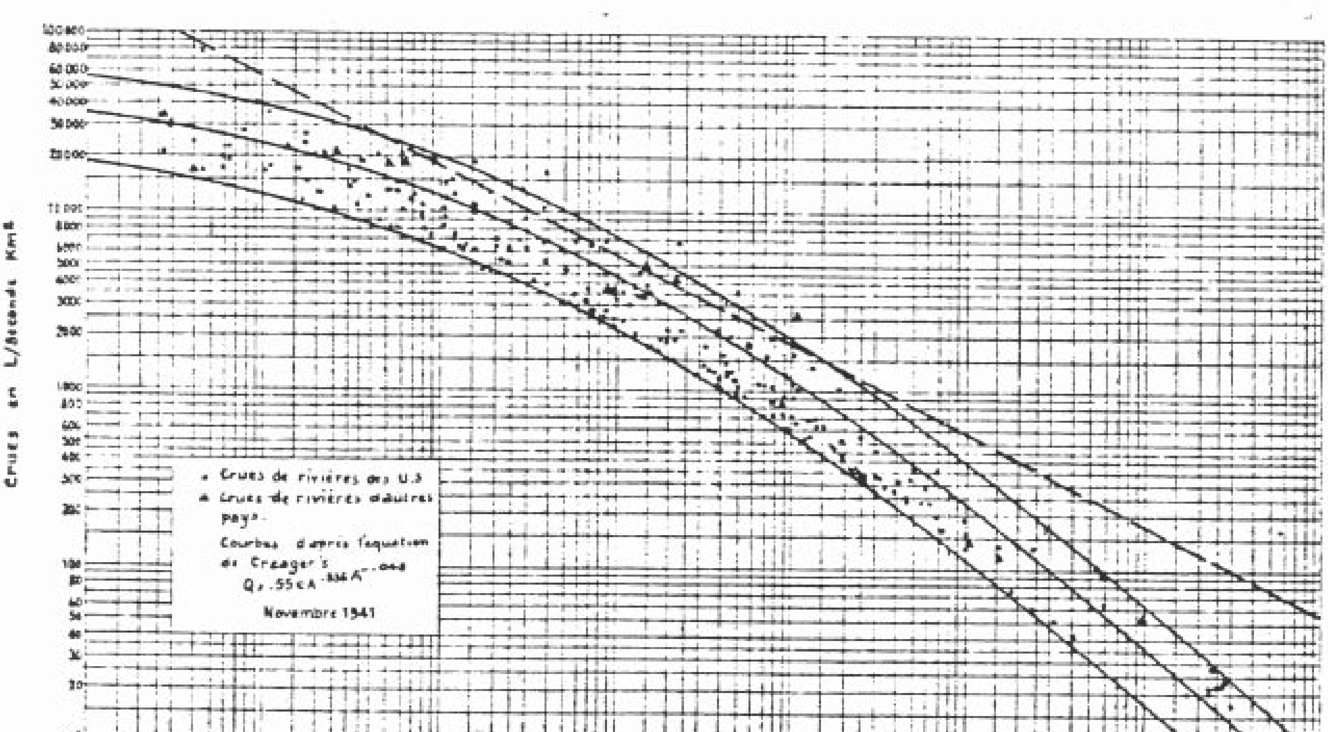
Nous nous excusons de ne pouvoir d'ores et déjà donner une méthode simple et précise de calcul des crues, mais espérons que ce qui précède, quoique très incomplet, montrera d'une part l'ampleur du sujet et la diversité des problèmes qu'il pose, d'autre part, le genre de travaux qu'il faudra effectuer pour résoudre ces problèmes.



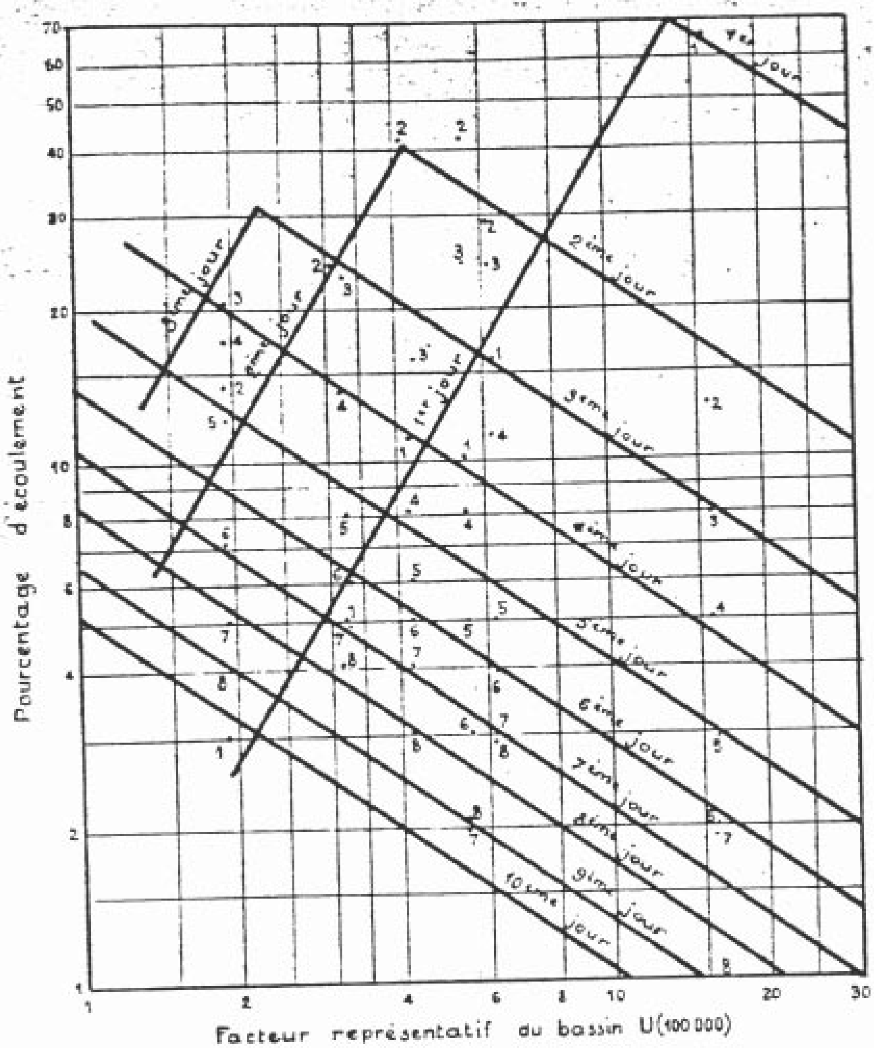
Ce graphique est destiné à montrer la différence du comportement asymptotique de diverses lois.
On a fait coïncider les points de probabilité 1/2 et 1/10. Les lois tirées de l'équation d'Epstein se trouveraient entre celles de Gauss et Gumbel si l'on calcule sur la variable elle-même, et au-delà de celle de Galton si l'on suppose le calcul effectué sur les logarithmes. Les courbes en pointillé sont des 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.

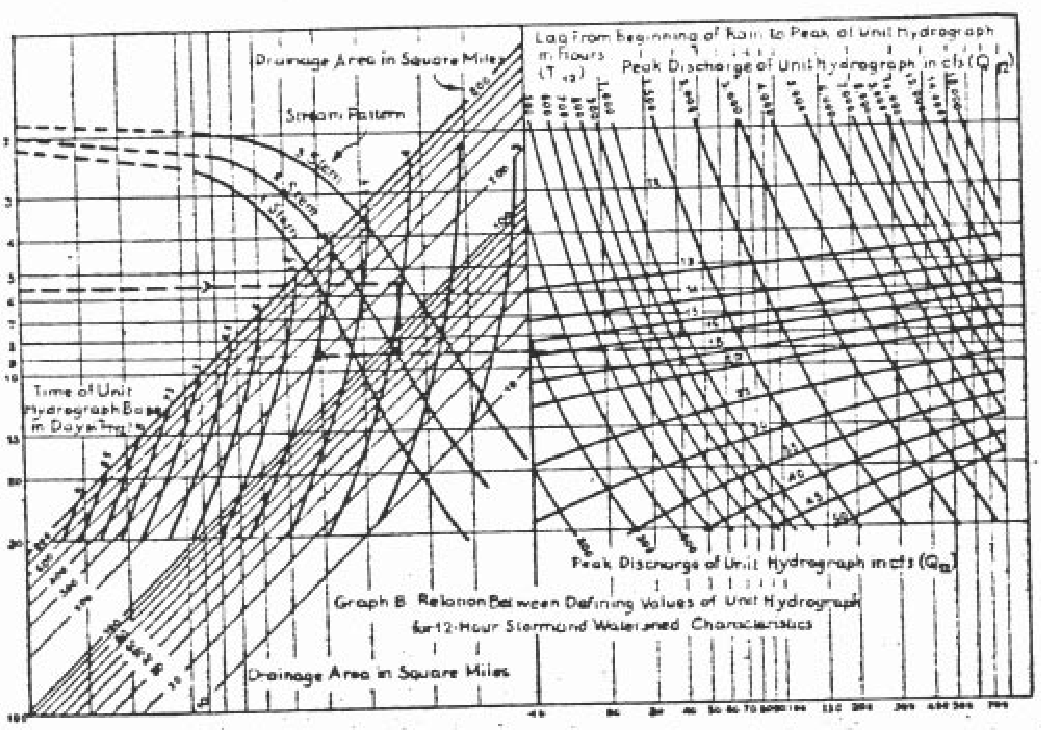


• Valeur observée de W 50
• Valeur observée de W 75



Relations entre le [illegible]
et le pourcentage écoulé par jour.





Relations entre les caractéristiques du bassin et l'hydrogramme unitaire pour un orage de 12 heures (From Gerald T. McCarthy, *The Unit Hydrograph and Flood Routing*, U.S. Engineer's Office, Providence, R.I. (1938; rev. 1939.)

B I B L I O G R A P H I E

-:-:-:-:-

On trouvera dans ce qui suit une bibliographie assez incomplète. A peu près 80 % des articles cités ont été lus par nous dans la préparation de ce travail. Les lecteurs que d'autres références intéresseraient en trouveront à la fin des articles cités, en particulier JARVIS a donné une bibliographie presque exhaustive de ce qui est paru avant 1935. Nous avions eu l'intention d'accompagner chaque citation d'un résumé de l'article en question; on se rendra compte aisément que le volume de la bibliographie aurait alors dépassé celui de la note elle-même.

- BACHET (M.)

Méthode graphique d'annonce des crues.- Houille Blanche, n° spécial B/1948, p. 153-159.

- BACHET (M.)

La propagation et l'annonce des crues.- Ann. des Ponts et Chaussées, mai-juin 1934, p. 409-465.

- BACHET et BEAU

Nouvelle méthode de prévision des crues.- Ann. des Ponts et Chaussées, juillet-août 1940.

- BAILEY (S.M.) et SCHNEIDER (G.R.)

The maximum probable flood and its relation to spillway capacity.- Civil Engineering, janvier 1939, p. 32.

- BARROWS (H.K.)

Floods, their hydrology and control.- New York, Mac Graw Hill, 1948, 432 p.

- BARROWS (H.K.)

Precipitation and runoff and altitude relations for Connecticut River.- National Research Council, juin 1932.

- BARNES (B.E.)

The structures of discharge recessive curves.- T.A.G.U., 1939, 4, p. 721-738.

- BEARD (R.)

Statistical analysis in hydrology.- A.S.C.E., 1943, 108, p. 1110.

- BERNARD (M.M.)

Formulas for rainfall intensities of long duration.- A.S.C.E., 1930, paper n° 1801.

- BERNARD (M.M.)

An approach to determinate stream flow.- A.S.C.E., 1935, p. 345-395.

- BERNARD (M.M.)

Flood forecasts that reduce losses.- Engng. News Record, 25 nov. 1948, p. 64-66.

- BERNARD (M.M.)

Formulas for rainfall intensities of long duration.- A.S.C.E., 1932, p. 592.

- BERNARD (M.M.)

Unit hydrograph method and storm transposition in flood problems relating to great storms in Eastern and Central United States.- Geological Survey, Water Supply Paper, n° 772, 1936.

- BERNARD (M.M.)

Flood forecasting. Climate and man.- Yearbook of Agriculture, Dep. of Agric., 1941, p. 565-576.

- BERNARD (M.M.)

Hydrometeorology. A coordination of meteorology and hydrology.- T.A.G.U., 19, 1938, p. 598-602.

- BERNARD (M.M.)

Primary role of meteorology in flood flow estimating.- A.S.C.E., 1944, 109, p. 311-349.

- BERNARD (M.M.) et WILSON (W.F.)

A new tëchnique for determination of heat necessary to melt snow.- T.A.G.U., p. 178-181, 1941.

- BJERKNES (J.)

The processes responsible for the extreme rates of precipitation.- T.A.G.U., I, 1941, p. 104.

- BLASIUS (M.W.)

Storms, their nature, classification and laws.- Philadelphie 1875, p. 141-145.

- BLEICH (S.D.)

Rainfall studies for New-York.- A.S.C.E., Trans. 100, 1935, p. 609-644.

- BOGARDI (J.)

Le coefficient de ruissellement et les quantitiés d'eau à évacuer.- Vizügyi Közlémenyek, 1944, 1-4, p. 6-62.

- BRANCATO (George N.)

Meteorological behavior and characteristics of thunderstorm.- Wealth. Bur., avril 1942 (Hydrometeor. Section).

- BRATER (E.F.)

The unit hydrograph principle applied to small water-sheds.- A.S.C.E., 105, 1940, p. 1154-1192.

- CAMPINI (G.)
Contributo alla teoria delle piene nelle reti idrauliche.- L'Energia Elettrica, 1930.

- CARWELL (D.W.) et DICKERSON (W.E. jr.)
Runoff from terraced areas under conditions of extreme floods.- T.A.G.U., 1941, p. 856.

- CHENG (H.M.)
A graphical solution for flood routing problems.- Civil Engng., mars 1946.

- CLARK (C.O.)
Application of flood storage accouting methods.- T.A.G.U. août 1949, p. 528-532.

- CLARK (C.O.)
Flood storage accounting.- T.A.G.U., 6, 1944, p. 1014-1023.

- CLARK (C.O.)
Storage and unit hydrograph.- A.S.C.E., 110, p. 1419-1446, 1945.

- CLARKE-HAFSTAD (Miss K.)
The spacing of raingages and the measurement of flood producing rain.- T.A.G.U., 1942, II, p. 557-558.

- CLINE (L.M.)
Storms, floods and sunshine, a book of memoirs.- Pelican Publ. Co, New Orleans, 1945, 289 p.

- CLYDE (George D.)
Snow melting characteristics.- Logan, Utah Techn. Bull., 231, août 1931.

- COLLINS (W.T.)
Run-off distribution graphs from precipitation occuring in more than one time unit.- Civil Engng., sept. 1939, p. 559.

- CREAGER (W.P.)
Possible and probable future floods.- Civil Engng., 1939, p. 668.

- CREAGER, JUSTIN et HINDS
Engineering for dams. T. I.- New York, J. Wiley, 1946.

- CROSS (W.P.)
Local floods in Ohio during 1947.- Water Research Board Colombus, 1948, 66 p.

- DEL PRA (A.)
Il calcolo della portata massima dei canali di bonifica.- L'Ingegnere, 1931.

- DEL PRA (A.)
Il calcolo della portata di piena nei canali di bonifica.- L'Ingegnere, 1932.

- DREIBELBIS (F.R.)
Some influences of frost penetration on the hydrology of small watersheds.- T.A.G.U., avril 1949.

- DREIBELBIS (F.R.)
What becomes of our rainfall.- Soil and Water Conservation, avril 1947, 2, p. 97, 101-108.

- DREIBELBIS (F.R.) et HARROLD (L.L.)
A summary of percolation and other hydrologic data obtained from the Coshocton monoliths lysimeters.- Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 10, 1945, p. 451-457.

- DULEY (F.L.) et KELLY (L.L.)
Effect of soil type, slope and surface conditions on intake of water.- Nebr. Agric. Exp. Stat. Research Bull., n° 112, 1939.

- EATON (E.C.)
Flood and erosion problems and their solution.- A.S.C.E., octobre 1936, p. 1302.

- EDLEFSEN et ANDERSON
Thermodynamics of soil moisture.- Hilgardia, vol. 15, février 1943, n° 2.

- EINSTEIN (H.A.)
Surface-runoff and infiltration.- T.A.G.U., déc. 1945, p. 431-434.

- ELLISON (W.D.)
Some effects of raindrop and surface flow and soil erosion and infiltration.- T.A.G.U., déc. 1945, p. 415-429.

- ELLISON (W.D.) et SLATER (C.S.)
Factors that effect surface sealing and infiltration of exposed soil surfaces.- Agric. Engng., 26, avril 1945, p. 156-157-162.

- ESCUTT (L.B.)
Surface drainage.- London, J. Crowthers, 1943, 98 p.

- EVANGELISTI (G.)
Sul calcolo dei coefficienti idrometrici nelle bonifiche a scolo mecanico.- Energia Elettrica, 1941.

- FANTOLI (G.)
Le acque di piena nella rete delle fognature di Milano.- -1940.

- FISCHER (Karl)
Die Sommerhochwasser der Oder.- J. für Gewasserkunde Norddeutschland, 1907.

- FLETCHER (R.D.)
Computation of thunderstorm rainfall.- T.A.G.U., février 1948, p. 41-50.

- FOLSE (J.A.)
A new method of estimating stream flow based upon a new evaporation formula.- Carnegie Inst. Publ., n° 400, 237 p.

- FOSTER (E.E.)
Rainfall and runoff.- New York, Mac Millan, 1948.

- FOSTER (E.E.)
Evaluation of flood losses and benefits.- A.S.C.E., 1942, 107, p. 871.

- FREE (G.R.), BROWNING (G.M.), MUSGRAVE (G.W.)
Relative infiltration and related physical characteristics of certain soils.- U.S. Dept. Agric. Techn. Bull., n° 729, 1940.

- FROLOW (V.)
Sur la prévision des crues de la Seine à Paris.- Rev. de Géographie Physique, 1939, 4 , p. 379-386.

- FULLER (W.E.)
Flood flows.- Trans. A.S.C.E., 1914, 77, p. 564.

- GARDNER (W.H.)
Determination of the critical stream for various slopes.- Soil Sci., vol. 66, 1948, p. 205-215.

- GEYER (J.C.)
New curve fitting method for analysis of floods records.- T.A.G.U., II, 1940, p. 660-668.

- GIBRAT (R.)

Aménagement hydroélectrique des cours d'eau. Statistique mathématique et calcul des probabilités.- R.G.E., 15 octobre 1932, p. 493-501, 22 octobre 1932, p. 525-532.

- GIBRAT (R.)

Sur l'ajustement mathématique des courbes de débit d'un cours d'eau.- C.R. Acad. Sci., 7 mars 1932.

- GRASSBERGER (H.)

L'emploi du calcul des probabilités pour le calcul des débits des cours d'eau.è Die Wasserwirtschaft, 15 janvier 1932, p. 16-22.

- GILCREST (B.R.) et MARSH (L.E.)

Channel storage and discharge relation in the Lower Ohio Valley.- T.A.G.U., 22nd Ann. Meeting, 1941.

- GLASSPOOLE (J.)

Areas covered by intense and widspead falls of rain.- Proc. Inst. Civ. Engrs., 1930, vol. 229.

- GREGORY (R.L.) et ARNOLD (C.E.)

Runoff. Rational runoff formulas.- A.S.C.E., 1932, paper n° 1812, p. 1039-1177.

- GROVER (N.C.)

The floods of march 1936.- U.S. Geol. Survey, Water Supply Paper, n° 798, 799, 800, 1937-1938.

- GUMBEL (E.J.)

Simplified plotting of statistical observations.- T.A.G.U., août 1945, p. 69-82.

- GUMBEL (E.J.)

The return period of flood flows.- Ann. Math. Stat., 12, n° 2, 1941.

- GUMBEL (E.J.)

On the plotting of flood discharges.- T.A.G.U., p. 699-716, 1943.

- GUMBEL (E.J.)

Probability interpretation of the observed return periods of floods.- T.A.G.U., 1941, III, p. 836.

- GUTHE (O.E.)

A proposed method for calculating stream flood.- T.A.G.U., 1941, III, p. 799.

- HARROLD (L.L.)
Has the small-area flood been neglected ?.- Civil Engng. oct. 1949, p. 38-39.

- HARROLD (L.L.)
Thunderstorms and runoff at high elevation in Northwestern New Mexico.- T.A.G.U., 1943, II, p. 425.

- HAZEN (Allen)
Flood flows.- New York, John Wiley, 1930.

- HENNIG (R.)
Records d'averses (Wolkenbruch-Records).- Wetter Klima, 1948, 1, n° 7-8, p. 244-246.

- HOLTAN (H.N.)
Time condensation in hydrograph analysis.- T.A.G.U., déc. 1945.

- HOLZMAN (B.) et SHOWALTER
Storm and floods.- Climate and man.- Yearbook of Agriculture, Dept. of Agriculture, 1941, p. 551-557.

- HORNER (W.W.) et LLOYD (C.L.)
Infiltration capacity values as determined from a study of an eighteen months record at Edwardsville (Ill.).- T.A.G.U., II, 1940, p. 522-540.

- HORNER (W.W.) et FLYNT (Fl.)
Relation between rainfall and runoff from small urban areas.- A.S.C.E., octobre 1936, p. 140.

- HORTON (R.E.)
Virtual channel inflow graphs.- T.A.G.U., III, 1941, p. 811.

- HORTON (R.E.)
Flood crest reduction by channel storage.- T.A.G.U., 1941, III, p. 820-835.

- HORTON (R.E.)
Infiltration and runoff during the snow melting season with forest cover.- T.A.G.U., août 1945, p. 59.

- HORTON (R.E.)
Natural stream channel storage.- T.A.G.U., 1936, p. 406-415.

- HORTON (R.E.)
Convectional vortex rings-hail.- T.A.G.U., février 1949, p. 29-44.

- HORTON (R.E.)
The physics of thunderstorms.- T.A.G.U., déc. 1948, p. 810-844.

- HORTON (R.E.)
Determination of infiltration capacity for large drainage basins.- T.A.G.U., 1937, II, p. 371-385.

- HORTON (R.E.)
Correlation of maximum rain intensities for long and short time intervals.- Monthly Weather Rev., 49, 1921, p. 200-202.

- HORTON (R.E.)
Analysis of runoff plat experiments with varying infiltration capacity.- T.A.G.U., 1939, p. 693-711.

- HORTON (R.E.)
Surface runoff phenomena.- Publ. 101, Horton Hydrological Labor. Voorheesville, 1935.

- HORTON (R.E.)
Role of infiltration in hydrologic cycle.- T.A.G.U., 1933, p. 446.

- HOYT (J.C.)
Comparison between rainfall and runoff in the North Eastern United States.- A.S.C.E., 1907, vol. 59, p. 431-520.

- HOYT (W.G.)
Studies of relations of rainfall and runoff in the United States.- U.S. Geological Survey, Paper n° 772, 1936.

- HOYT (W.G.)
Unusual events and their relation to federal water policies.- A.S.C.E., octobre 1943, p. 290.

- HUMPHREYS (W.J.)
The thunderstorm and its phenomena.- Monthly Weather Rev., juin 1941, 42, p. 348-380.

- HUPNER (M.)
Note sur la propagation des crues.- Paris, 1941, 25 p. (note dactylographiée).

- HURSH (C.R.) et BRATER (E.F.)
Separating storm hydrographs from small drainage areas into surface and subsurface flow.- T.A.G.U., III, p. 863, 1941.

- IMBEAUX (Dr.)
Prévisions des crues et des étiages.- Ass. Plenière de Prague, 1927 de l'Association Internationale d'Hydrologie Scientifique.

- IMBERECHTS (H.)
Les méthodes statistiques appliquées à l'hydrologie fluviale.- Ann. Trav. Publ. de Belgique, juin 1944, p. 241-263, octobre 1944, p. 598-620, déc. 1944, p. 753-777.

- Indices statistiques de la variation du régime d'une rivière.- Rev. de Obras Publicas, 1er janvier 1931.

- IZZARD (C.F.) et AUGUSTINE (M.T.)
Preliminary report on analysis of runoff resulting from simulated rainfall on a paved plot.- T.A.G.U., 1943, II, p. 500-509.

- JARVIS (C.S.)
Flood in the United States.- Geol. Survey, Water Supply Paper, n° 771, 1936, 497 p.

- JARVIS (C.S.)
Flood stage records of the river Nile.- A.S.C.E., août 1935, p. 1012-1071.

- JARVIS (C.S.)
Rainfall characteristics and their relation to soils and runoff.- A.S.C.E., 1931, 95, p. 379-449.

- JARVIS (C.S.)
Flood flow characteristics.- A.S.C.E., 89, 1926, p. 985-1032.

- JARVIS (C.S.)
Early contribution to Mississippi river hydrology.- A.S.C.E., octobre 1943, p. 605.

- JARVIS (C.S.) et MURTS (H.C.)
Estimating annual yield from ungaged drainage basins and effect of land use treatment on surface runoff.- T.A.G.U., 1941, p. 875.

- JOHNSTONE (D.) et CROSS (W.P.)
Elements of applied hydrology.- N.Y. Ronald Press, 1949.

- KINNISON (H.B.) et COLBY (B.R.)
Flood formulas based on drainage basins characteristics.- A.S.C.E., 1945, p. 849-904.

- KIRKHAM (Don)
Artificial drainage of land : streamline experiments. The artesian basin. III.- T.A.G.U., déc. 1945, vol. 26, p. 393, 1939, p. 667, 1940, p. 587.

- KOHLER (M.A.) et LINSLEY (R.K.)
Recent development in water supply forecasting from precipitation.- T.A.G.U., juin 1949, p. 427-436.

- LADEN (N.R.), REILLY (T.L.) et MINOTTE (J.S.)
Synthetic unit graphs, distribution graphs and flood routing in the upper Ohio river basin.- T.A.G.U., II, 1940, p. 649-699.

- LANGBEIN (W.B.)
Channel storage studies and their application to the determination of infiltration.- T.A.G.U., 1938, p. 435-447.

- LANGBEIN (W.B.)
Channel storage and unit hydrograph studies.- T.A.G.U., II, 1940, p. 620-627.

- LANGBEIN (W.B.)
Annual floods and the partial duration flood series.- T.A.G.U., déc. 1949, p. 879-881, 1 fig., 2 tabl.

- LAPWOOD (E.R.)
Convection of fluid in a porous medium.- Proc. Cambridge Philos. Soc., 1948, p. 508-521.

- LAWS (J. Otis)
Measurement of the fall velocity of water drops and raindrops.- T.A.G.U., 1941, III, p. 709-721.

- LAWS (J. Otis)
Recent studies in raindrops and erosion.- Agric. Engng., vol. 21, p. 431-433, 1940.

- LAWS (J. Otis) et PEARSONS (D.A.)
The relation of raindrops size to intensity.- T.A.G.U., 1943, II, p. 452-459.

- LE BESNERAIS et GENTHIAL
Prévision des crues d'après la pluviométrie.- Section d'Hydr. Scientifique, Assemblée de Prague, 1927.

- LELLI (M.)
Determinazione della pioggia critica nel calcolo dei canali di bonifica.- l'Energia Elettrica, 1932.

- LELLI (M.)
Il calcolo dei canali di bonifica.- Ann. Lav. Publici, 1930.

- LIGHT (Phillip)
Analysis of high rates of snow melting.- T.A.G.U., p. 195-205, 1941.

- LINDQUIST (R.E.) et RICHARDS (M.M.)
Flood forecast centers. What makes them tick.- Engng. News Record, 1948, p. 98-100.

- LINSLEY (Roy K.) et ACKERMANN (William C.)
Method of predicting the runoff from rainfall.- A.S.C.E., 107, 1942, p. 825.

- LUGEON (J.)
Précipitations atmosphériques.- Paris, Dunod, 1928, 368 p.

- LYNCH (H.B.)
Transient flood peaks.- Tr. A.S.C.E., 1941, p. 199.

- MAC CARTHY (F.F.)
Forest cover and flood control.- A.S.C.E., 1929.

- MAC CLEAN (W.N.)
Extreme floods on rivers and streams.- Wat. Wat. Engng., mai 1946.

- MALANDRONE (I.)
Contribution à l'étude des débits catastrophiques des cours d'eau à bassin resséré.- Rev. Catast. Serv. Tec. Erariali, 1948, 3, n° 1, 61-64.

- MARQUINA
Les crues exceptionnelles du Douro.- Rev. de Obras Publicas, août 1949, p. 370-77.

- MARZOLO (Fr.)
Il concetto di probabilita nelle espressioni delle portate caratteristiche e di piena.- Padova, 1933, 27 p., Atti e Memor. Acad.Sci.

- MARZOLO (Fr.)
Sul principo dell'idrogramma unitario nello studio delle portate dei corsi d'acqua naturali.- Energia Elettrica, août 1946 p. 297-301.

- MARZOLO (Fr.)
La determinazione delle piogge critiche ed altre note riflettenti il regime di piena di reti idrauliche.- Energia Elettrica, octobre 1931, 8 p.

- MASSARI (U.)
Ancore della determinazione della portata del collettore di una rete di fogne.- Ann. Lav. Publ., 1927.

- MASSARI (U.)
Le piene massime nelle reti dei canali artificiali e negli alvei naturali.- Sind. Prov. Ing. Milano, 1931.

- MEAD (D.W.)
Hydrology.- New York, Mac Graw Hill, 1919.

- MEARS (F.C.)
Thunderstorm 28 août 1930.- Met. Mag., 66, févr. 1931, p. 15-17.

- MELIN (Ragnar)
Forecasting spring runoff of the forest rivers in North Sweden.- Assoc. Intern. Hydrol. Scient., n° 23, 1936.

- MEYER (O.H.)
Flood routing on the Sacramento river.- T.A.G.U., 1941, p. 117-124.

- MEYER (O.H.)
Analysis of runoff characteristics.- A.S.C.E., nov. 1938, p. 83-141.

- MEYER (Adolph F.)
Elements of hydrology.- New York, J. Wiley, 1944, 522 p.

- MIAMI CONSERVANCY DISTRICT
Storm rainfall of Eastern United States.- Miami Conserv. District, Techn. Rep. Part 5, 1936.

- MINISTERO DEI LAVORI PUBLICI
Piene dei corsi d'acqua italiana.- Rome, 1939, in-8, 153 p., n° 20.

- MINSER (E.J.) et HATHAWAY (G.A.)
Synoptic analysis on some excessive rainfalls in the Mississippi basin due to squeezing of tropical anticyclones.- Bull. Amer. Meteor. Soc., 19, janv. 1938, p/ 34-42.

- MONGIARDINI (V.)
Sui contributi di piena massima dei corsi d'acqua naturali.- Acqua, 1948, 26, n° 7-8, p. 77-85.

- MULLER et NEUHAUS
Le débit des pluies.- Ges. Ing., 68, 1947, n° 5, p. 143-148.

- National aspects of flood control. A symposium.- A.S.C.E., 1938, 103, p. 551.

- NEAL (J.H.)
The effect of the degree of slope and rainfall characteristics on runoff and soil erosion.- Research Bulletin n° 280, Missouri Agric. Exp. Exp. Station, 1938.

- PALMER (V.J.)
Retardance coefficients for low-flow in channels lined with vegetation.- T.A.G.U., avril 1946, p. 187-197.

- PARDE (Maurice)
Etudes américaines sur les crues.- Houille Blanche, A/1948, p. 653-661.

- PARDE (Maurice)
Etudes critiques sur la hauteur des crues.- Assoc. Intern. Hydrologie Scientifique, n° 23, 1936.

- PARDE (Maurice)
Le régime du Rhône.- Lyon, Masson, 1925, 2 vol.

- PARSONS (W.J.) jr.
Potential floods in the Sacramento valley; storm characteristics of the Sacramento basin.- T.A.G.U., 1941, p. 106-117.

- PARSONS (W.J.) jr.
Basin storage method of developing flood hydrographs for precipitation records.- T.A.G.U., 1944, I, p. 8-14.

- PASINI (P.)
Coefficienti idrometrici derivati dal lavoro della machine nelle bonifiche meccaniche.- Giorn. del Genio Civile, 1910.

- PAULSON (J.B.)
The measurement and computation of flood discharge.- T.A.G.U., 1939, I, p. 177-187.

- PAULSON (J.B.) jr.
A method for calculating the effect of snow on runoff during rainstorms.- T.A.G.U., 1944, I, p. 15-20.

- PICKELS (G.W.)
Drainage and flood-control engineering.- New York, Mac Graw Hill, 1941, 476 p.

- PIPER (Arthur M.)
Runoff from rain and snow.- T.A.G.U., août 1948, p. 511-529.

- PLATZMAN (George W.)
Computation of maximum rainfall in the Willamette basin.- Appl. Math., mai 1948, p. 467-472.

- POSEY (C.J.)
Slide rule for routing floods through storage reservoirs or lakes.- Engng. News Record, 25 avril 1935.

- POSEY (C.J.)
Functional design of flood control reservoirs.- A.S.C.E., octobre 1939, p. 1638-1674.

- POTTER (W.D.)
Effect of rainfall on magnitude frequency of peak rates of surface runoff.- T.A.G.U., octobre 1949, p. 735.

- PUPPINI (U.)
Il calcolo dei canali di bonifica.- Mon. Tec., 1923.

- PUPPINI (U.)
Le piogge nei canali di bonifica. Influenza del fattore "area della zona".- Giorn. Ass. Naz. Ing., It., 1921.

- PUPPINI (U.)
Influenza di afflusso e di invaso preesistenti alla pioggia nel calcolo del coefficiente idrometrico.- L'Ingegnere, 1932.

- PUPPINI (U.)
Verifica durante una notevole pioggia del funzionamento dei canali di bonifica.- Energia Elettrica, 1937.

- PUPPINI (U.)
Coefficienti idrometrici per variazione notevole della portata di afflusso.- Ac. delle Scienze di Bologna, 1933-1934.

- PUPPINI (U.)
Canali di bonifica. Le piogge piu gravi compatibili col franco in immediato raffronto colla possibilita climatica.- Energia Elettrica, janv.-févr. 1948, p. 20-23.

- RAMSER (C.E.)
Runoff from small agricultural areas.- Journ. Agric. Research, mai 1927, 39, p. 797.

- Report of Committee on floods.- J. Boston Soc. Civ. Engrs., sept. 1930, 17, n° 7.

- RICHARDS (R.D.)
Flood estimation and control.- Chapman and Hall, London, 152 p., 1944.

- RUFF (Charles F.)
Maximum probable floods on Pensylvania streams.- A.S.C.E., 1941, 106, p. 1453.

- RUGEN (O.K.)
The snow melt problem as affecting the design of flood control work.- T.A.G.U., 1940, p. 1033-1046.

- RUTTER (E.J.), GROVES (C.B.) et SNYDER (F.F.)
Flood routing.- A.S.C.E., 104, 1939, p. 275-313.

- SCHAFMAYER (A.J.) et GRANT
Rainfall intensities and frequencies.- A.S.C.E., 103, 1938, p. 362.

- SCHIFF (Leonard)
Classes and patterns of rainfall with reference to surface runoff.- T.A.G.U., 2, p. 438-451, 1943.

- SCHUMAN (T.E.W.)
The problem of the intensity frequency of rainfall of varying duration over any given drainage area.- Bull. Amer. Meteor. Soc., oct. 1942, p. 328-341.

- SHANDS (A.L.)
Maximum observed rainfalls in the U.S. for duration to 72 hours and areas to 100.000 sqm.- Bull. Am. Met. Soc., 1947, 28, p. 233-236.

- SHARP (A.L.) et HOLTAN (H.N.)
A graphical method of analysis of sprinkled plat hydrographs.- T.A.G.U., II, 1940, p. 557-569.

- SHERMAN (L.K.)
The hydraulics of surface run-off.- Civil Engng., mars 1940, p. 165.

- SHERMAN et MAYER (L.C.)
Application of the infiltration theory to engineering practice.- T.A.G.U., III, 1941, p. 666.

- SHERMAN (L.K.)
Infiltration and the physics of soil moisture.- T.A.G.U., I, 1944, p. 57-71.

- SHERMAN (L.K.)
Derivation of infiltration capacity (f.) from average loss rates.- T.A.G.U., II, 1940, p. 541-549.

- SHERMAN (L.K.)
The unit hydrograph and its applications.- J. Assoc. State Eng. Societies, avril 1941.

- SHIPLEY (J.F.)
The air currents in a lightening storm.- Q.J.R. Met. Soc., 67, octobre 1941, p. 340-345.

- SHOWALTER (A.K.)
An approach to quantitative forecasting of precipitation.- Bull. Amer. Meteor. Soc., 25, avril 1944, p. 137-142, 276-288.

- SHOWALTER (A.K.) et SOLOT (S.B.)
Computation of the maximum possible storm.- T.A.G.U., 1942, II, p. 258-274.

- SLADE (J.J.)
An asymmetric probability function.- A.S.C.E., octobre 1936, p. 35.

- SMETANA (J.)
Prévisions des niveaux d'eau et des débits des cours d'eau d'Europe.- Assoc. Int. Hydrol. Scient., n° 23, 1936.

- SNYDER (F.F.)
Synthetic unit graphs.- T.A.G.U., 1938, p. 447-454.

- SNEDER (C.G.)
Additional argument for modification of the rational formula for runoff from small agricultural areas.- T.A.G.U. I, 1944, p. 45-52.

- SNYDER (F.F.)
A conception of runoff phenomena.- T.A.G.U., 1939, p. 725-733.

- SNYDER (F.F.)
Predicting headwater riverstages directly from rainfall.- T.A.G.U., II, 1940, p. 485-489.

- SOLOT (S.B.)
Computation of the depth of precipitable water in a column of air.- Monthly Weather Review, avril 1939, p. 100-103.

- SORENSEN (K.E.)
Curves solve reservoir flood routing equations.- Civ. Engng., nov. 1949, p. 56-57.

- STEINBERG (L.H.)
A flood routing device.- T.A.G.U., avril 1947, p. 247-54.

- STEWART (G.R.)
Storms.- Random House, 1941. London.

- SUPINO (G.)
Il calcolo dei canali di bonifica.- L'Ingegnere, 1929.

- SUPINO (G.)
Le linee segnalatrici di possibilita climatica e il proporzionamento dei canali di scolo dedotto dalle osservazioni dirette delle piogge.- Ricerche di Ingegneria, 1935.

- SUPINO (G.)
Le reti idrauliche.- Bologna, 1938.

- SWITZER (F.G.)
Probability of flood flows.- Proc. A.S.C.E., avril 1927, p. 563.

- THOM (H.C.S.)
On the statistical analysis of rainfall data.- T.A.G.U., II, 1940, p. 490-498.

- THOMAS (H.A.)
Graphical integration of the flood wave equations.- T.A.G.U., II, 1940, p. 596-602.

- THOMAS (H.A.)
The hydraulics of flood movement in rivers.- Carnegie Inst. Techn. Publ., 1937.

- THOMAS (H.A.)
Frequency of minor floods.- J. Boston Soc. Civ. Engrs., 1948, n° 4, 425-442.

- THORNTHWAITE (C.W.)
The reliability of rainfall frequency determination.- T.A.G.U., 1937, II, p. 476.

- THORNTHWAITE (C.W.) et HOLZMAN (B.)
Measurement of evaporation from land and water surfaces.- U.S. Dep. of Agric. Techn. Bull., n° 817, 1942.

- TIPPETT (L.H.C.)
On the extremes individuals and the range of samples taken from a normal population.- Biometrika, 3-4, vol. 17, déc. 1925.

- TURNER (J.M.) et BURDOIN (A.J.)
The flood hydrograph.- Journ. of Boston, Soc. of Civ. Engrs., juil. 1941, p. 272.

- VARENNES et MENDONCA
Sur la formule de Iszkowski pour la détermination du débit de la crue maxima.- Ann. Inst. Sup. Agron., 1948, 11 p.

- VELIKANOV (M.A.)
Formation of storm floods.- C.A. Acad. Sci. U.R.S.S., 1945, 49, n° 3, p. 184-7.

- VELIKANOV (M.A.)
Analyses hydromécanique de l'écoulement sur les pentes.- (en russe).- Izvestia Institutia Ghidrotechniki, Leningrad, vol. 15, 1935, p. 19-26.

- VELIKANOV (M.A.)
Trente années d'hydrologie (en russe).- C.R. Acad. Sci. U.R.S.S., série géographique et géophysique, tome XI, n° 5, 1947.

- WEATHER BUREAU
A report of the maximum possible precipitation over the Ohio River tributary Basius above Pittsburg (Pa.).- U.S. Weather Bureau, juin 1941.

- WEATHER BUREAU
A report on the maximum possible precipitation over the Ompompanoosue basin above Union village, Vermont.- U.S. Weather Bureau, mars 1940.

- WEATHER BUREAU
The record rainfalls of the world.- Month. Weather Rev., déc. 1941, 69, p. 357.

- WILLIAMS (G.R.) et CRAWFORD (L.C.)
Maximum discharges at stream-measurement stations.- Geol. Survey, Water Supply Papers, n° 847, 1941, 272 p.

- WILLIAMS (G.R.)
Drainage of leveed areas in mountainous valleys.- A.S.C.E. octobre 1943, p. 83.

- WILM (H.G.)
Methods for the measurement of infiltration.- T.A.G.U., 1941, p. 678.

- WILSON (W.T.)
An outline of the thermodynamics of snow melt.- T.A.G.U., 1941, p. 182-195.

- WILSON (W.T.)
A graphical flood routing method.- T.A.G.U., III, 1941, p. 893.

- WISLER (G.O.) et BRATER (E.F.)
A direct method of flood routing.- A.S.C.E., 1942,107, p. 1519.

- YARNELL (David L.)
Rainfall intensity-frequency data.- U.S. Dep. Agric. Misc. Bull. n° 204, 1935.

- ZINGG (A.W.)
The determination of infiltration rates on small agricultural watersheds.- T.A.G.U., 1943, p. 475.

- ZOCH (Richmond T.)
On the relation between rainfall and stream flow.- Monthly Weather Rev., sept. 1934, p. 315-322, 1 fig.