

Scale coefficients are derived from formulas. For example, $M_Q = M_F M_a$ for runoff at constant rainfall intensity, where $M_F = F_n/F_M$ and $M_a = a_n/a_M$ are given.

In conclusion I should like to note the necessity of intensification of work on physical modelling for storm runoff computation and research.

Essai de classification des crues maximales

J. Francou, Électricité de France,
Paris, France,
J.A. Rodier,
Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer Paris, France

SUMMARY: The method of envelope curves can be of considerable use for the study of exceptional floods in regions where observation data are insufficient, especially for rivers with very heavy floods. "Électricité de France" has undertaken much research of this kind and found it interesting to establish in a form convenient for engineers, the family of enveloping curves using more than a thousand representative points of floods already mentioned by various authors or determined by the Hydrological Services of the "Électricité de France" or of ORSTOM extending over the whole globe.

The authors present a fragment of the diagrams now in print. Directions for the utilization of this family of curves are given corresponding at the formula:

$$\frac{Q}{Q_0} = \left(\frac{S}{S_0}\right)^{1-(k/10)}$$

Each value of the coefficient k corresponds to a known hydrological regime. This formula can be used independently of the system of units.

RÉSUMÉ : La méthode des courbes-enveloppes peut être très utile pour l'étude des crues exceptionnelles dans les régions où les données sont insuffisantes, surtout pour les rivières à très fortes crues. « Électricité de France » a fréquemment à procéder à des études de ce genre et a jugé intéressant d'établir, sous une forme commode pour les ingénieurs, un réseau de courbes-enveloppes s'appuyant sur plus de mille points représentatifs de crues déjà cités par divers auteurs ou déterminés par son service Hydrologique ou celui de l'ORSTOM et s'étendant sur tout le globe.

Les auteurs présentent un extrait de ce recueil de diagrammes actuellement à l'impression. Des directives sont données pour l'utilisation de ces réseaux de courbes correspondant à la formule :

$$\frac{Q}{Q_0} = \left(\frac{S}{S_0}\right)^{1-(k/10)}$$

Chaque valeur du coefficient k correspond à un régime hydrologique déterminé. Cette formule peut être utilisée indépendamment du système d'unité.

Il est encore présent dans bien des mémoires que le chantier de Kariba eut à faire face, dès la première année, à une crue déjà « exceptionnelle », et la deuxième année à un événement dont on ne savait plus s'il fallait oser ou ne pas oser le qualifier de « dix-millénaire ».

Avant qu'il ne fut question de Kariba, quelques hommes de chantier, apparemment philosophes autant qu'ingénieurs, s'étaient déjà donné de la crue « millénaire » une définition assez impertinente: « c'est la crue qui a de bonnes chances d'intervenir au cours des deux années les plus critiques de la construction d'un barrage ».

Cette boutade permettra à la fois d'expliquer et d'excuser l'incursion, au domaine des hydrologues, d'un ingénieur dont ce n'est pas la spécialité. Il en profitera pour mettre ses collègues en garde contre l'apparente simplicité de la méthode qui va être exposée: il est hors de question - pense-t-il - de mettre au point quelque miraculeux abaque qui permettrait à chacun de jouer le prophète aux moindres frais.

Par contre, si nous avons la chance de trouver audience favorable auprès des hydrologues de tous pays, le travail ici présenté pourrait devenir la première ébauche d'un document qui paraît très nécessaire: l'inventaire méthodique et hiérarchisé des crues enregistrées sous différents climats comme phénomènes exceptionnels.

De nombreux auteurs abordant le problème de l'intensité maximale des crues à redouter dans telle ou telle région ont adopté pour cette étude un diagramme logarithmique qui porte en abscisses les surfaces des bassins versants concernés, et en ordonnées les débits ou les débits spécifiques.

Avant de recourir une fois de plus à ce même mode de représentation, il n'est peut-être pas inutile de le justifier autrement que par la seule commodité de "mise en page". Tout, en la circonstance, est basé sur des rapports ou sur des proportions: telle surface réceptrice est le double ou le triple de telle autre; telle crue a dépassé de 12 % ou de 15 % la précédente crue-record enregistrée au même lieu.

L'hydrologue d'ailleurs utilise systématiquement la règle à calculs, tandis qu'il n'aurait que faire d'un outil qui additionnerait ou soustrairait des nombres naturels... De sorte que c'est en utilisant le papier logarithmique qu'il donnera la représentation la plus fructueuse des phénomènes qu'il étudie.

Pour la plupart des auteurs, les courbes enveloppes des crues de fréquence rare pour une région déterminée se concrétisent, en coordonnées logarithmiques, par des droites dont l'équation est donc $Q = A \cdot S^n$ si l'on étudie directement le débit, ou $q = A S^{n-1}$ si l'on étudie le débit spécifique. Pour d'autres, l'équation est plus complexe: c'est le cas pour le diagramme bien connu publié par Craeger, Justin et Hinds dans *Engineering for Dams*, et qui reflète une documentation importante arrêtée en novembre 1941.

Depuis cette époque, l'évaluation des crues maximales a fait des progrès, l'emploi des procédés de maximisation conjugués avec la méthode des isochrones donne, par exemple, des résultats moins hasardeux que les méthodes anciennes et on a eu tendance à délaïsser le recours aux courbes enveloppes, auxquelles on peut faire les deux reproches suivants: les données ne sont pas homogènes, soit parce qu'elles correspondent à des périodes de retour différentes, soit parce qu'elles sont déterminées avec des précisions très variables: l'erreur peut être de 5 à 10 % dans le cas le plus favorable à 50 et peut-être 100 % dans les cas les plus ardu: il est en effet bien difficile de mesurer certains débits lorsque les vitesses dépassent 6 m/s et que la proportion de l'eau dans le flot qui s'écoule par rapport à la masse de boue, de pierres et de débris emportés, est très mal connue.

Cependant, la méthode des courbes enveloppes, employée avec discernement, peut rendre encore de grands services pour les deux raisons suivantes:

1. Dans les pays où on dispose de très peu de données, on manque généralement des éléments nécessaires pour employer les méthodes modernes;
2. Ces méthodes, malgré leur rigueur apparente, nécessitent tout au long de leur application un certain nombre de choix qui, s'ils sont peu judicieux, peuvent conduire à un résultat moins rigoureux qu'il n'apparaît au premier abord. Il est donc excellent que l'hydrologue, à la fin de ses calculs, confronte les résultats obtenus avec les don-

nées de l'expérience représentées sous la forme du diagramme log log. Il est bon aussi que de son côté, l'ingénieur auquel l'hydrologue donne un chiffre de crue exceptionnelle consulte également le même diagramme; s'il est surpris par la position du point, il prendra contact avec l'hydrologue qui, ou lui donnera une explication de cette position insolite s'appuyant sur des bases solides, ou plein d'inquiétude salutaire reverra ses calculs en employant d'autres méthodes.

C'est pourquoi Électricité de France (Coopération hors Métropole) a jugé utile d'établir et de tenir à jour un tel diagramme. La variable étant donc le logarithme de la surface, nous avons choisi comme fonction le logarithme du débit plutôt que celui du débit spécifique: on évite ainsi, à chaque pointé graphique, un coup de règle à calculs qui semble superflu, et pourrait être source d'erreurs.

ÉLABORATION DU GRAPHIQUE

Pointant ainsi les différentes valeurs répertoriées par Craeger comme « crues-record » sur la majeure partie du territoire des États-Unis, on constate que l'on peut donner comme limites supérieure et inférieure du nuage des points deux droites qui convergent en dehors des limites utiles du graphique.

Pointant de la même façon les « crues-record » citées par le même auteur pour trois régions hydrologiques des U.S.A., assez différentes du reste du territoire:

- Ouest du golfe du Mexique (Texas);
- Missouri - Mississipi supérieur - Colorado;
- Ouest des Rocheuses (Grand Bassin et Snake River), on trouve encore pour chacun de ces ensembles une limite supérieure et une limite inférieure rectilignes qui semblent converger vers le même point que précédemment.

Enfin, examinant le cas de quelques crues mémorables citées par M. PARDÉ¹ et observées en deux points au moins de leur passage, on constate que le segment de droite qui s'appuie sur les points représentatifs prend encore la direction du « point de fuite » ci-dessus évoqué. C'est le cas par exemple:

- pour la Corrèze le 4-X-1960, sur 370 et 947 km²;
- pour l'Ardèche le 22-IX-1890, sur 470 et 1 940 km²;
- pour une crue en Galicie le 17-VII-1934 sur 1 150, 4 345 et 6 813 km²;
- pour le Rhône le 31-V-1856, sur 20 500 et 95 500 km²;
- comme aussi pour les crues causées par le cyclone Diane au Nord-Est des États-Unis les 18 et 19 août 1955. Dans ce dernier cas, 14 points représentatifs, (pour des bassins versants allant de 186 à 17 570 km²) ne sont évidemment pas tous alignés, mais se tiennent dans un pinceau relativement étroit.

Bien entendu, la convergence d'autant de droites vers un même point ne se présente pas de façon rigoureuse, et la recherche d'une grande précision serait trompeuse: les coordonnées du point de concours s'exprimeront en chiffres ronds:

- pour la surface: 100 millions de km²;
- pour le débit: 1 million de m³/s.

1. Maurice PARDÉ : Sur la puissance des crues en diverses parties du Monde (1961).

Ces chiffres ont-ils une signification physique? La question vient naturellement à l'esprit. Or il se trouve, toujours approximativement:

- que la surface de 100 millions de km² correspond à celle de l'ensemble des terres émergées, calottes glaciaires et déserts exclus;
- que le débit de 1 million de m³/s correspondrait à la somme des modules de l'ensemble des fleuves qui drainent cette même surface.

La coïncidence est-elle fortuite, ou bien fallait-il s'y attendre?

Notre propos n'étant pas d'établir une théorie, mais seulement de présenter un instrument de travail que l'expérience nous a révélé utile, nous laisserons la question vierge aux spécialistes qui voudraient s'y intéresser.

On trace le diagramme en faisant converger vers le point de fuite ainsi déterminé des droites de pente variable. On constate qu'il faut faire varier la pente de 1 à 0,4 pour couvrir pratiquement la totalité des points représentatifs des crues répertoriées par différents auteurs comme phénomène de fréquence rare.

Ainsi les crues les plus violentes enregistrées de par le monde se trouvent-elles alignées sur la droite ayant la pente la plus faible.

Pour avoir un coefficient représentatif « K » qui croisse au contraire lorsque croît la violence des phénomènes, nous avons choisi d'effectuer la transformation:

$$k = 10(1 - \text{tg } \alpha)$$

qui conduit aux équivalences suivantes:

$$\begin{array}{cccccccc} \text{tg } \alpha \rightarrow & 1 & 0,9 & 0,8 & 0,7 & 0,6 & 0,5 & 0,4 \\ k \rightarrow & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{array}$$

Cette numérotation achève la constitution du diagramme.

EXPRESSION MATHÉMATIQUE

Comme nous l'avons signalé plus haut, la majorité des formules de courbes enveloppes proposées jusqu'à maintenant sont de la forme:

$$Q = AS^n$$

le coefficient A et l'exposant n différant selon les auteurs et surtout, bien entendu, selon les régions concernées.

D'autres formules, plus complexes, font intervenir deux, trois, ou même quatre paramètres¹. Quant aux droites que nous venons de définir, elles ont pour équation:

$$\frac{Q}{Q_0} = \left(\frac{S}{S_0} \right)^{1 - (k/10)}$$

(avec, dans le système métrique $Q_0 = 10^6$ et $S_0 = 10^8$ et dans le système anglo-saxon $Q_0 = 3,535 \cdot 10^7$ et $S_0 = 3,86 \cdot 10^7$).

L'expression même montre que l'équation est indépendante du système d'unités adopté: le diagramme établi reste en effet identique à lui-même, à une translation près sur la trame logarithmique, lorsque l'on change de système.

Le coefficient K aurait donc un caractère d'universalité, que l'on peut considérer comme satisfaisant pour l'esprit, et qui sur le plan pratique permettrait aux hydrologues

1. Voir A. COUTAGNE, 4^e Congrès des Grands Barrages (1951) Question 12 — Rapport 84. et M^{me} LARIVAILLE, ouvrage de M. PARDÉ déjà cité.

du monde entier de caractériser par un même chiffre des crues d'intensité comparable. Cas particuliers: pour $K=5$, on retrouve (dans le système métrique) l'équation $Q = 100S^{1/2}$ qui a été plusieurs fois proposée comme celle de la courbe enveloppe sous certains climats, pour $K=0$ on trouve $Q = S/100$ équation qui, malgré son indigence, peut aussi caractériser des crues « exceptionnelles » dans des régions à l'hydrologie particulièrement pauvre.

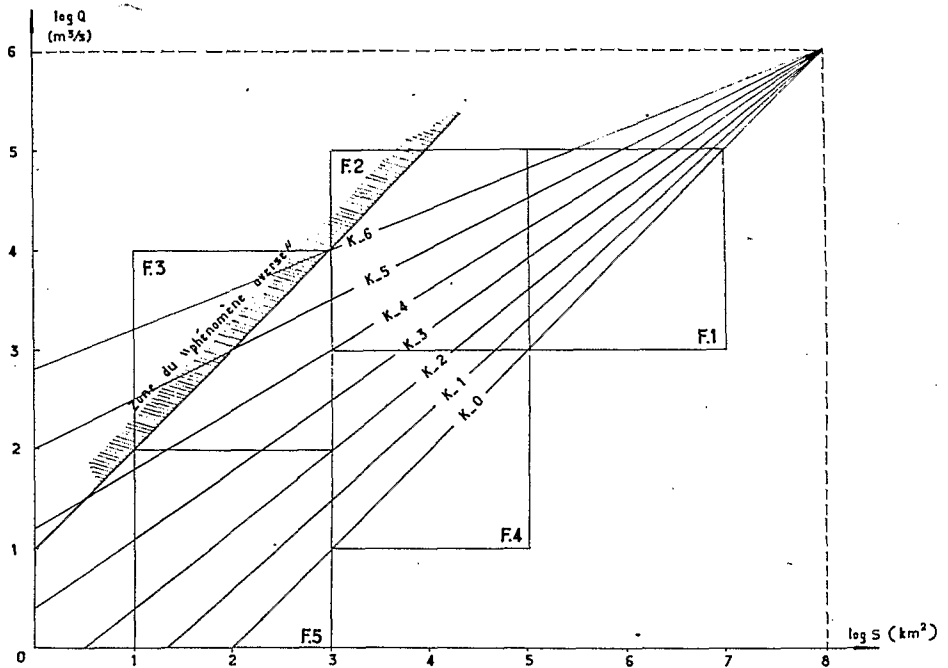


FIGURE 1. Principe du diagramme et tableau d'assemblage des 5 feuilles

LIMITATION DU DIAGRAMME

Si l'on prolongeait les droites de coefficients K élevés (5 à 6) dans le domaine des petits bassins versants, on aboutirait à des débits extravagants, ou tout au moins jusqu'à maintenant non constatés.

Cela tient à ce que l'on entre dans un domaine où les différents paramètres susceptibles de modéliser une crue n'ont plus qu'une influence de second ordre vis-à-vis de l'intensité de l'averse qui en est l'origine. Il y a donc une limite au-delà de laquelle on n'étudie plus de « phénomène-crue » mais directement le « phénomène-averse ». Où convient-il de situer cette limite ?

D'après M. PARDÉ (ouvrage cité plus haut), il faut déjà considérer comme événements rares les averses dont l'intensité se maintient à 40 mm/h, pendant un temps suffisant pour qu'elles deviennent « déterminantes » de crues sur des bassins versants de quelques dizaines de km². De telles averses ruisselées à 95 %, conduisent à un débit spécifique de 10 m³/s.km². Des débits spécifiques plus importants ont pu être mesurés en plusieurs points du globe, conséquences directes d'averses dont on peut qualifier l'intensité de phénoménale.

Nous nous proposons donc d'admettre que, passée la limite de $10 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2$, le débit spécifique lui-même donne la mesure directe de l'intensité du phénomène, et qu'aucun « coefficient » ne saurait par conséquent lui être préféré.

QUELQUES VALEURS DE K PARMIS D'AUTRES

Il n'est présenté ci-contre qu'un extrait des graphiques établis lors de cette étude, leur publication in extenso aurait dépassé le cadre imposé pour ce Colloque: ils sont actuellement en cours de publication, avec les tableaux qui les accompagnent.

Il est possible de définir la valeur de K correspondant aux cours d'eau les plus dangereux de chaque région naturelle, une étude complète n'en pouvant être faite que par des hydrologues qui la connaissent bien. C'est pourquoi nous ne donnerons ci-après que quelques indications sur les régions du monde où les valeurs de K sont les plus fortes, et, pour les valeurs de K plus faibles, que sur les cours d'eau où nous avons été appelés à faire des études hydrologiques.

Ainsi qu'on le savait déjà, la valeur de K la plus élevée: $K=6$ correspond au Sud du Texas avec probablement les régions limitrophes du Nouveau-Mexique et du Mexique. Mais l'examen des débits de crues mentionnés par la Commission Economique des Nations Unies pour l'Asie et l'Extrême-Orient dans son étude de courbes enveloppes présentée au 4^e Séminaire de Bangkok (1966) met en évidence le fait que la région affectée par les typhons dans le Pacifique (Corée, Japon, Philippines, Formose et la côte Est du Viet-Nam) bénéficie, si l'on peut dire, du même coefficient 6. Plus au Sud, en Nouvelle-Calédonie, K serait un peu plus faible: 5,8. Il est à noter qu'au Texas, le coefficient K tend à décroître quand la superficie du bassin dépasse $15\,000-20\,000 \text{ km}^2$, ce qui est normal puisqu'il s'agit de régions semi-arides. Dans le Pacifique, il s'agit toujours de bassins d'assez faible superficie: inférieure à $10\,000 \text{ km}^2$ pour le Japon, $1\,000 \text{ km}^2$ pour la Nouvelle-Calédonie. Les petits cours d'eau de la Nouvelle-Zélande et de l'Ile de la Réunion auraient un coefficient K plus faible, bien que les reliefs et la pluviométrie soient comparables: cela tient, ainsi qu'il a été dit plus haut, à l'exiguïté des bassins versants qui conduit à considérer directement le débit spécifique.

On rencontre pour la valeur de K de l'ordre de 5,5 à 5,6 une partie des cours d'eau des Indes et de l'Australie, jusqu'à $50\,000 \text{ km}^2$, certains cours d'eau de l'Amérique Centrale et du Mexique.

La valeur 5,4-5,5 correspondrait à la Nouvelle-Zélande (cours d'eau moyens), probablement aux régions les plus arrosées et les plus montagneuses du Viet-Nam et aux cours d'eau les plus violents de la Méditerranée: Pyrénées Orientales et Cévennes (en France), Apennins (en Italie).

Au Sud de la Méditerranée, les cours d'eau les plus violents d'Afrique du Nord présenteraient peut-être des valeurs de K un peu inférieures à 5: 4,7-5, valeurs à rapprocher des plus fortes observées en Espagne.

Pour les grands fleuves les plus impétueux de Chine et des Indes, K serait compris entre 5 et 5,2.

On trouve des valeurs de 4,8 à 5,2 sur les côtes Est et Nord-Ouest, et les Hauts Plateaux de Madagascar où les cyclones produisent des crues assez comparables à celles du Pacifique (quoique un peu plus faibles).

Les fleuves à régimes tropical et méditerranéen du Brésil et de l'Uruguay présentent des valeurs de K comprises entre 4,5 et 4,8 (mais on doit trouver bien plus dans la Cordillère des Andes). Ces valeurs sont voisines de celles rencontrées sur l'Ohio, les cours d'eau des Appalaches et de la Californie.

Les grands fleuves tropicaux d'Afrique: Niger, Sénégal, Sanaga, sont relativement calmes: K varie de 2 à 3 lorsqu'il n'y a pas encore de grandes plaines d'inondation; au-delà, la notion de bassin versant n'a plus de sens, on le voit bien pour les cours d'eau

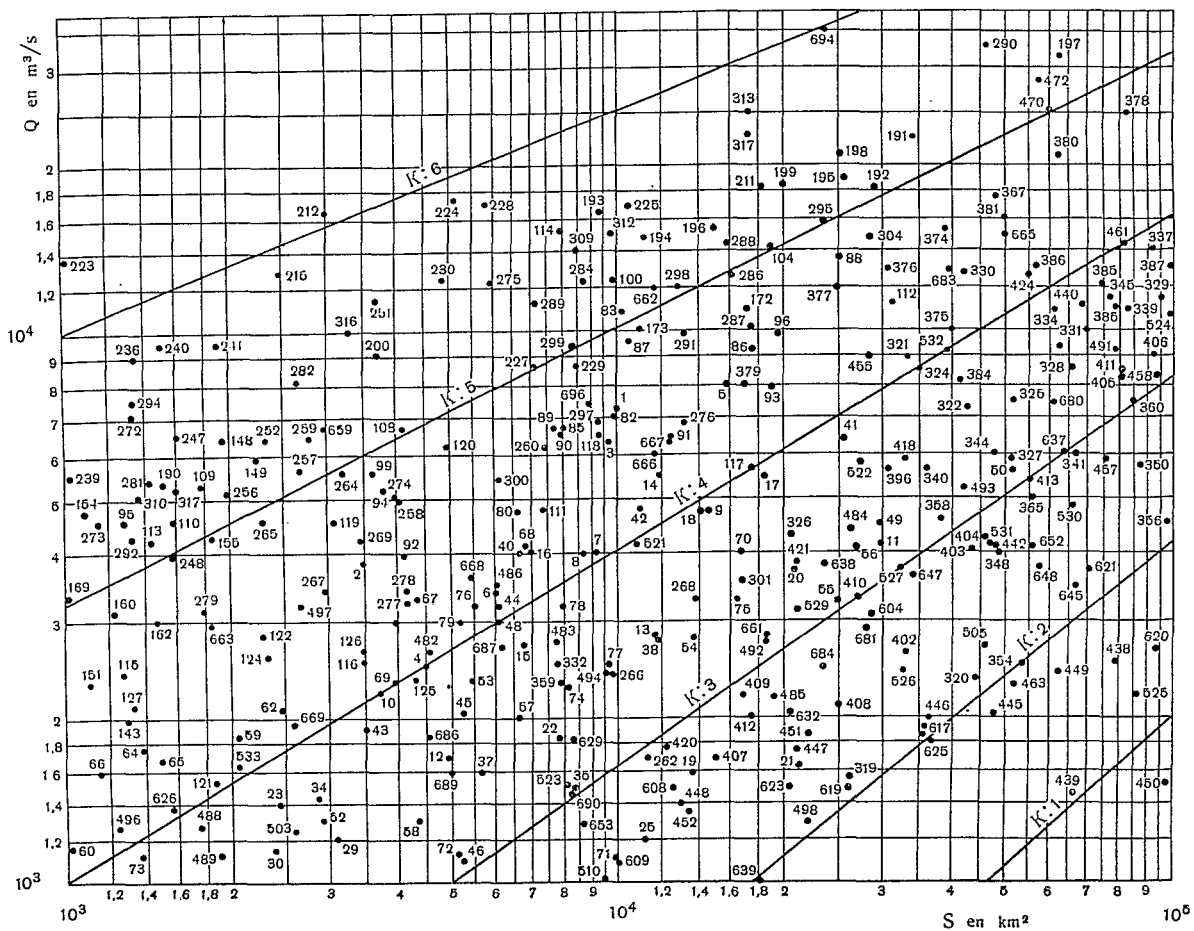


FIGURE 2. Extrait du diagramme (feuille 2)

intermittents de plaine en zone semi-aride pour lesquels K varie de 0 à 2, il est même souvent négatif.

En forêt équatoriale d'Afrique, si les précipitations sont peu abondantes et les pentes faibles K varie de 1 à 2,5. Si les précipitations sont assez abondantes, comme pour l'Ogooué, $K=3$. Ce chiffre est à rapprocher de ceux trouvés en Guyane, mieux arrosée: $K=2,8$ à 3,5 et sur l'Amazone $K=3,9$.

En Europe, K est voisin de 2 sur les fleuves calmes (Seine), voisin de 3,5 pour les fleuves alpins non méditerranéens: Rhin, Rhône, Danube. Pour la Loire $K=4$, pour le Pô $K=4,4$.

CONCLUSION

Ni ce très rapide aperçu, ni la publication plus étoffée (1 200 points environ) des diagrammes complets et des tableaux de chiffres correspondants ne peuvent prétendre faire le tour de la question. Aussi suggérons-nous que les hydrologues des diverses parties du monde intéressés par cet aspect du problème des crues se penchent sur les diagrammes dès qu'ils seront édités, et établissent les valeurs de K pour les régions qu'ils connaissent. Nous proposons également que l'on procède à une confrontation des données, ce qui améliorerait grandement nos connaissances en ce domaine.

Il doit être également possible d'utiliser ces diagrammes pour des études plus poussées: leurs propriétés doivent plus ou moins reposer sur des relations théoriques qu'il serait fort intéressant d'approfondir. Mais nous soulignons le fait qu'ils ont été établis dans un but essentiellement pratique, et qu'il ne serait pas souhaitable que des raffinements séduisants ne conduisent à les déformer, ce qui risquerait de les rendre moins maniables.

Il importe aussi de préciser les points suivants: nous n'avons que fort peu évoqué la notion de fréquence. Pour fixer les idées, disons qu'une bonne partie des points correspond à une période de retour de 100 ans; il faut en tenir compte. D'autre part, on a surtout considéré dans chaque région les cours d'eau les plus turbulents, mais pour une même région certains cours d'eau peuvent présenter, pour des raisons physiques bien connues, des crues relativement modérées; un fleuve par exemple pour lequel $K=5$ dans le secteur amont peut se perdre ensuite dans des plaines d'inondation de sorte que K tomberait à 3 à l'aval.

Il faut donc beaucoup de discernement pour utiliser ces diagrammes, mais dans certains cas ils peuvent être irremplaçables. Leur valeur reposant essentiellement sur le nombre et sur la qualité des chiffres recueillis, le présent travail pourrait être considéré comme un premier pas vers un inventaire plus complet et plus efficace.

DISCUSSION

M.M. PODANI (Roumania)

Nous utilisons une corrélation plus précise de type $Q=f(H/\sqrt{S})$, ou « H » - altitude moyenne du bassin, « S » - superficie du bassin.

Réponse par M.J. RODIER:

Il existe de nombreuses formules régionales pour les courbes enveloppes. Si on considère les régions pour lesquelles le coefficient K est voisin de 6: le nuage de points relatifs au Texas a la forme d'un croissant, plus à droite sur la figure on trouve les nuages relatifs à la Corée, au Japon, aux Philippines etc. On peut donner une formule régionale pour la courbe bordant chaque croissant vers le haut. A l'intérieur du nuage «régional» on peut considérer d'autres courbes limites correspondant chacune à un autre facteur que

la superficie du bassin, l'altitude par exemple, comme dans la formule dont parle M. Podani.

Mais lorsque l'on étudie les crues d'une région où elles sont très fortes, on a souvent intérêt à examiner la question sur le plan mondial en espérant que la considération des crues sur un très grand espace compensera la brièveté de la période d'observation, comme dans la méthode des stations - années. Il vaut mieux alors considérer des formes de courbes enveloppes très simples telles que nos droites définies par K . Mais ceci n'enlève rien à la validité des courbes obtenues sur le plan régional.

Professeur D.L. SOKOLOVSKY (USSR):

L'exposé de M. RODIER de la classification des crues et des paramètres donnant la possibilité de déterminer la crue maximale par la méthode la plus simple, est très intéressant et je voudrais compléter un peu cet exposé et communiquer l'expérience de l'utilisation d'une méthode analogue en URSS.

La formule simple de débits et de modules maximaux (débits spécifiques) exposée dans le rapport de M. Rodier sous la forme de:

$$Q_{\max} = AS^n \quad (1)$$

ou sous la forme de:

$$q_{\max} = \frac{Q_{\max}}{S} = \frac{A}{S^{1-n}} \quad (2)$$

ou

$$q_{\max} = \frac{A}{(S+1)^{1-n}} \quad (3)$$

est employée en URSS, il y a longtemps, et est nommée « la formule de réduction ».

Des formules (2) et (3) il suit, que si $S = 1 \text{ km}^2$ ou $S \rightarrow 0$, $q_{\max} = A$. Alors le paramètre A a un sens physique déterminé, comme un module élémentaire maximal ou l'intensité maximale d'écoulement le long de la pente qui, évidemment, ne peut dépasser, en absence des embâcles l'intensité maximale de la fonte des neiges déterminée par l'énergie de la balance thermique ou l'intensité maximale de la pluie pour un intervalle minimal. Par des considérations théoriques et pratiques on a choisi un intervalle égal à 1 heure.

C'est pourquoi on peut écrire pour des crues maximales provenant de la fonte de neige

$$A_c = K_p a_{\max c} \cdot X_0 k_c \quad (4)$$

et pour des crues maximales provenant de la pluie

$$A_g = k_p a_{\max g} \cdot X_0 \quad (5)$$

où:

K_p coefficient de dimension égal à 0,28;

$a_{\max, c}$ et $a_{\max, g}$ intensité maximale de la fonte des neiges ou l'intensité de la pluie;

X_0 coefficient d'écoulement élémentaire;

K_c coefficient de transition de l'intensité de la fonte des neiges à l'intensité du ruissellement de l'eau dessous de la couche de neige.

En se basant sur formules (4) et (5) et en acceptant $X_0 = 1,0$, on peut obtenir des valeurs extrêmes de modules d'écoulement maximaux, d'origine nivale ou pluviale. Ainsi, par exemple, en se basant sur la formule (4) on peut déterminer que $A_i \geq 10-15 \text{ m}^3/\text{sec}/\text{km}^2$ ($S = 1 \text{ km}^2$ ou $S \rightarrow 0$) cette valeur est confirmée par des observations

de longue durée de plusieurs stations hydrologiques de l'URSS y compris des années de crues maximales catastrophiques comme 1908, 1926, 1931, 1947 et d'autres. Des modules maximaux d'écoulement pluvial peuvent être obtenus par la formule (5) quand $X_0 = 1,0$.

Par cette formule, en acceptant l'intensité de la pluie horaire $a_{\max, g}$ pour beaucoup de pays subtropicaux égale à 250-350 mm, on peut obtenir une valeur limite A_g quand $X_0 = 1,0$ égale à

$$A_g = 0,28 \times 350 = 98 \text{ m}^3/\text{sec}.$$

Le résultat obtenu est confirmé par l'analyse des crues maximales les plus catastrophiques, observées sur des fleuves divers selon les données indiquées dans les articles de M. PARDÉ: pas une seule crue maximale déterminée par la formule $A = q_{\max} S^{1-n}$ ne surpasse la limite 80-100 m^3/sec à l'exception des crues maximales sur des fleuves au Texas contenant une grande quantité d'alluvions.

On peut voir par ces données qu'on observait des valeurs maximales $A_g = 80-100 \text{ m}^3/\text{sec}$ sur des fleuves au Texas, au Japon et aux Philippines. Des valeurs $A_g = 40-60 \text{ m}^3/\text{sec}$ correspondent aux crues maximales du bassin de la Méditerranée et des valeurs $A_g = 20-40 \text{ m}^3/\text{sec}$ correspondent aux crues maximales sur les fleuves des Karpathes et d'Extrême-Orient. En ce qui concerne l'exposant « n » dans la formule (1) qui présente le coefficient angulaire des droites logarithmiques $q_{\max} = f(S)$ la valeur de cet exposant, compte tenu de la théorie et des données empiriques, que je n'ai pas la possibilité de présenter ici, se trouve aux limites, $n = 0,20-0,25$ pour des crues nivales, $n = 0,3-0,4$ pour des crues pluviales causées par des averses de longue durée. En conclusion de mon intervention je voudrais souhaiter que les recherches de crues maximales sur les fleuves du monde entier soient continuées pour avoir la possibilité de déterminer par un méthode plus simple, les crues maximales possibles.

Mr. J. RODIER (France)

Je tiens à apporter quelques précisions concernant les courbes enveloppes:

1. Le point théorique de débit 1 000 000 m^3/sec correspond à une superficie de 100 000 000 km^2 , ce qui ne veut pas dire qu'un fleuve, si grand soit-il, puisse produire un débit de cet ordre de grandeur.

2. La courbe enveloppe mondiale ne se déplace presque plus depuis 30 ans. La droite-enveloppe mondiale a été dessinée par M. Francou, il y a une dizaine d'années. A cette époque cette droite, qui correspond à une valeur de notre coefficient K égale à 6, ne s'appuyait que sur 3 ou 4 points fournis par Craeger.

Depuis, les crues extrêmes observées, en particulier celles dont les résultats ont été publiés par ECAFE ont fourni une dizaine de points supplémentaires qui viennent s'aligner à peu près sur la droite $K=6$ et rendent son tracé plus sûr, mais il n'a pas été nécessaire de prendre une courbe-enveloppe plus élevée correspondant à K plus grand que 6. Il est possible que des courbes-enveloppes régionales établies sur des périodes relativement courtes puissent se déplacer vers le haut de décennie en décennie. La droite-enveloppe que nous avons tracée ($K=6$) passe par des points $Q = 37 000 \text{ m}^3/\text{sec}$, $S = 20 000 \text{ km}^2$ correspondant à 1,8 $\text{m}^3/\text{sec} \cdot \text{km}^2$. Il s'écoulera longtemps avant qu'on soit amené à la déplacer vers le haut de façon sensible.