

Hydr.

Compte Rendu

(SOCIÉTÉ HYDROTECHNIQUE DE FRANCE)

des X^{mes} JOURNÉES DE L'HYDRAULIQUE

QUESTION I

RAPPORT 4

(PARIS, 1968)

LA PRÉVISION DES CRUES ET LA PROTECTION CONTRE LES INONDATIONS

CONTRIBUTION A LA MÉTHODOLOGIE DE PRÉDÉTERMINATION DES CRUES DE FRÉQUENCES RARES SUR DE PETITS BASSINS

J. RODIER

Conseiller Scientifique à Electricité de France
Chef du Service Hydrologique
de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer

et M. ROCHE

Ingénieur en Chef à Electricité de France

Les auteurs présentent les méthodes mises au point par les hydrologues de l'ORSTOM pour les calculs des débouchés de ponts et des déversoirs de petits barrages.

On utilise un modèle global, basé généralement sur l'hydrogramme unitaire dont l'application se justifie par les forts ruissellements. Les données pluviométriques résultent d'études systématiques des précipitations journalières et de l'abattement avec la surface du bassin. Les éléments du modèle sont établis, sur bassins représentatifs, par des recherches approfondies sur les relations entre précipitations et débits avec emploi de régressions multiples et sur les paramètres de l'hydrogramme standard. On donne un aperçu sur les résultats de ces recherches et sur leur orientation future.

This paper discusses calculation methods developed by ORSTOM hydrologists for bridge outlets and small barrage weirs. They require an overall model, which is usually based on the unit hydrograph, application of the latter being justified by the considerable amount of runoff in the catchment area. The rainfall data are obtained from systematic studies of daily rainfall and reduction with increasing catchment area size. The model elements are determined for representative catchment areas by detailed research into rainfall/runoff relationships, with use of multiple regressions on the standard hydrograph parameters. The results of this research and the lines along which it may be expected to proceed in future are described.

O. R. S. T. O. M.

Collection de Référence

n° 13939 B

43729

Il est difficile de définir de façon précise ce qu'on entend par petit bassin versant. La limite supérieure de la superficie varie suivant l'homogénéité des caractéristiques géomorphologiques, la superficie couverte en général par les averses et la structure du réseau hydrographique. L'Organisation Météorologique Mondiale, dans son Guide des Pratiques Hydrométéorologiques, précise que dans les régions de plaine, un bassin versant de superficie inférieure à 3 000 - 5 000 km² est un petit bassin versant; en montagne, cette limite supérieure a été fixée à 1 000 km². Pour fixer les idées, nous admettons, dans ce qui suit, qu'un petit bassin couvre moins de 2 000 km².

En ce qui concerne la prédétermination des débits de crue, les petits cours d'eau présentent un certain nombre de caractères communs, en particulier :

— les valeurs maximales des débits sont plus ou moins étroitement liées à un épisode pluvieux de courte durée ou même à une simple averse,

— ils sont souvent fort négligés dans l'établissement des réseaux de base de stations hydrométriques, de sorte que, surtout pour les très petits bassins (superficie inférieure à 50 km²), il n'est pas possible de trouver des relevés de débits portant sur un bon nombre d'années,

— les crues à calculer correspondent assez souvent à des périodes de retour de durée modérée, 10 ans, 20 ans ou 50 ans, surtout pour les très petits bassins où la modicité des débits conduit à des ouvrages relativement peu coûteux et dont souvent la rupture ne conduit pas obligatoirement à des conséquences catastrophiques. Il est donc logique de prendre des risques non négligeables. C'est le cas par exemple, à la limite, pour des lacs collinaires; ceci n'est pas valable, au contraire, pour la plupart des barrages hydro-électriques à régularisation annuelle.

Nous exposerons, ci-après, les méthodes auxquelles ont abouti les hydrologues d'Electricité de France (IGECCO) et de l'ORSTOM pour le calcul des crues exceptionnelles concernant des ouvrages (ponts, digues, barrages) en régions tropicales et méditerranéennes, en laissant de côté les bassins de moins de 50 hectares pour lesquels le calcul du débit maximal de la crue revient à la détermination d'une intensité de précipitation et d'un coefficient de ruissellement.

Il n'existe presque jamais dans ces régions de station de jaugeage installée depuis plus de quelques années sur des bassins de ces dimensions. Par contre, nous disposons généralement de relevés de précipitations portant sur une quarantaine d'années et à partir desquels des études systématiques nous ont conduits à une assez bonne connaissance de la distribution et des caractéristiques des précipitations exceptionnelles, sauf pour les

petites îles des zones tropicales où le manque de relevés de longue durée en montagne a empêché jusqu'ici toute étude sérieuse. On sait cependant que dans ce cas, en particulier à la Réunion, les précipitations (1 800 mm en 24 h) et les débits (22 m³/s.km² pour 30 km²) ne sont pas loin des records mondiaux. On a utilisé tout simplement dans ce dernier cas les courbes-enveloppes sous la forme pratique mise au point par J. Francou (Symposium de Leningrad, 1967).

Ces cas particuliers étant réglés, on voit qu'il y a tout intérêt à utiliser à fond les données des précipitations pour estimer les débits de crues exceptionnelles.

PRINCIPES GÉNÉRAUX

Il existe deux approches correctes :

1) Passer par des considérations plus ou moins théoriques de la loi statistique de distribution des précipitations exceptionnelles à celle des débits. Ceci est en général impraticable, sauf dans des cas limites. La méthode du gradex exposée par MM. Guillot et Duband correspond à un de ces cas.

2) Mettre au point un opérateur pluies-débits, utiliser cet opérateur pour transformer en crues la totalité de l'échantillon d'averses dont on dispose et procéder à l'analyse statistique de l'échantillon de crues reconstituées. Ceci exige que l'opérateur soit bien au point et que l'on dispose de moyens de calcul automatique. Nous n'avons pas encore utilisé systématiquement cette méthode par manque d'ordinateur mais, sur certains de nos bassins représentatifs, par exemple celui de Boundjoug (Symposium de Budapest), nous avons tous les moyens de le faire.

En attendant, nous utilisons une troisième méthode moins sûre : nous déterminons l'averse correspondant à la fréquence choisie pour le projet, averse décennale par exemple, nous supposons pour cette averse des conditions (humidité du sol, état de la couverture végétale, répartition spatiale et temporelle de l'averse) ni trop favorables, ni trop défavorables, nous déterminons les éléments du modèle de transformation pluies-débits et nous l'appliquons à l'averse décennale d'où la crue décennale dont on compare le chiffre à celui déjà obtenu pour des bassins analogues. Au point de vue de la méthodologie, ceci n'est pas très rigoureux : sur le bassin du Nion (région de Man, Côte d'Ivoire) par exemple, on a trouvé, pour trois averses de hauteur voisine de 100 mm, les coefficients de ruissellement suivants : 3 %, 12 % et 20 %, soit des volumes de crues variant de 1 à 7 suivant les conditions de saturation. On voit com-

bien est délicat, pour ce bassin très perméable, le choix des conditions de saturation à affecter à l'averse de hauteur décennale. Mais, dans le cas du calcul de la crue non plus décennale ou cinquantenaire, mais *maximale*, cette troisième méthode est valable à condition de choisir des valeurs défavorables pour les facteurs secondaires de l'averse.

TYPES DE MODÈLES

Le choix du modèle de transformation pluie-débit est lié surtout à la dimension du bassin et à la nature de la répartition spatiale de l'averse. Si le bassin est assez petit pour être considéré comme homogène dans ses caractéristiques physiques et couvert par des averses pas trop hétérogènes, on peut adopter un modèle global, sinon on considérera un modèle matriciel.

On conçoit qu'il n'est pas possible de donner une limite de superficie universellement valable qui délimiterait les domaines d'application de ces deux types de modèle. En Afrique tropicale par exemple, avec des averses orageuses intenses, on peut fréquemment fixer la limite de ces modèles à 25-50 km² si le bassin est homogène. Si le bassin n'est pas très homogène, la limite est bien en deçà. Sur le bassin de Korhogo par exemple, on a dû introduire, comme facteur correctif dans le calcul du coefficient de ruissellement, l'éventualité de chute de pluie dans la moitié aval ou la moitié amont du bassin, ce qui prouve bien que l'on éprouve déjà une certaine gêne à y utiliser un modèle global.

Nous ne parlerons pas ici de modèles matriciels qui font l'objet d'une communication de MM. Roche et Dubreuil, et dont un des types le plus simple est constitué par le modèle de la méthode de Larrieu. Nous ne parlerons ici, que des modèles globaux qui utilisent presque toujours, dans nos régions à précipitations assez intenses, les principes de l'hydrogramme unitaire.

MODÈLE D'AVERSE

Pour nos modèles globaux, nous utilisons d'abord un modèle de l'averse. Il est défini par sa hauteur qui est supposée constante sur tout le bassin, un diagramme de variation des intensités et une valeur de l'indice de l'humidité.

La hauteur est déduite de la valeur ponctuelle de la fréquence désirée par application d'un coefficient d'abattement. De laborieuses études nous

ont enfin conduits à une méthodologie correcte et simple pour l'évaluation de ce coefficient, nous l'avons décrite au Symposium de Leningrad de 1967. Mais il faudra encore l'étudier sur une trentaine de bassins représentatifs avant de donner des valeurs vraiment sûres. Actuellement, on admet en Afrique Occidentale et Centrale que ce coefficient est égal à 1 pour $S < 25 \text{ km}^2$, 0,95 pour $25 < S < 50 \text{ km}^2$, ces valeurs sont probablement surestimées, ce qui joue en faveur de la sécurité.

Le diagramme d'intensité adopté est un diagramme de pluie orageuse simplifié avec souvent 75 % de l'averse tombant entre 45 mn et 90 mn avec des intensités dépassant 40 mm/h. On les restitue assez facilement grâce à une étude systématique des courbes d'intensité-durée faite récemment en Afrique Occidentale et au Tchad.

Pour l'indice d'humidité, dont on reparlera plus loin, plusieurs expressions ont été retenues : l'indice de Kohler : $I_h = \sum p_{ie}^{-k t_i}$ ou l'indice

$$I_h = \sum \frac{p_i}{t_i} \text{ qui est non convergent, mais cela n'a}$$

pas d'importance, pour des raisons qu'il serait trop long d'expliquer ici, ou des indices simplifiés tels que le débit de base Q_0 avant le début de la crue, l'intervalle de temps t_d à la première averse ayant donné lieu à ruissellement, etc. Aucun indice simple ne nous a donné satisfaction dans tous les cas et, pour certains cas, nous n'en avons trouvé aucun; ceci résulte de la nature réelle complexe des processus physiques. On choisit une forme d'indice valable pour le bassin considéré et on considère une valeur normale pour la saison des pluies (pour la crue maximale, on prendrait la valeur maximale observée).

HYDROGRAMME UNITAIRE

L'ensemble des éléments utilisés pour transformer le modèle d'averse en crue dépend du mode d'écoulement. Fort heureusement, dans la plupart des régions où notre Service est amené à travailler, un *ruissellement superficiel* très net a déjà lieu au cours des crues relativement modérées. Dans ces conditions, les processus sont vaguement linéaires et on peut appliquer la méthode de l'hydrogramme unitaire; celle-ci suppose que pour des averses efficaces de durée inférieure à une limite, tous les hydrogrammes se déduisent les uns des autres par homothétie. Il existe donc un hydrogramme-type pour chaque bassin. Pour les averses de durée supérieure à la durée limite, il suffit de les découper en tranches de faible durée et d'ajouter les ordonnées des hydrogrammes correspondant à ces tranches. En fait, les phéno-

mènes ne sont pas si linéaires qu'on veut bien le dire : on trouve plusieurs hydrogrammes-types, un pour les faibles crues par exemple et un pour les fortes crues. Ceci, joint au fait que cette méthode ne s'applique que s'il y a ruissellement superficiel, interdit souvent son application pour la prévision des débits (les débits moyens et faibles ne correspondent pas obligatoirement à du ruissellement superficiel), alors qu'elle est généralement utilisable pour les crues exceptionnelles qui donnent surtout lieu à du ruissellement superficiel.

MODÈLE POUR LA FORME DE L'HYDROGRAMME

Si la méthode est applicable, le modèle global comporte 2 ensembles d'éléments : l'un définit la forme de la crue, c'est l'hydrogramme-type, l'autre le volume de débit correspondant à une averse donnée. Pour la détermination de l'hydrogramme-type, rappelons qu'on doit choisir des averses dont le corps est assez court et qui a ruisselé fortement et de façon assez homogène sur le bassin. Bien des échecs dans l'application de cette méthode résultent du fait que ces conditions n'ont pas été respectées.

Pour des raisons que nous verrons plus loin, nos hydrologues se sont efforcés de mettre au point des méthodes telles que le caractère un peu subjectif de l'établissement de l'hydrogramme-type, dans chaque cas particulier, disparaisse et qu'un petit nombre de paramètres définissant cet hydrogramme soit bien mis en évidence. Ceci nous a conduits à la conception de l'hydrogramme standard. Cette méthode sacrifie un peu la précision mais elle rend beaucoup plus aisée la comparaison des formes d'hydrogramme et la recherche de l'influence des facteurs géomorphologiques qui en sont responsables.

Tout d'abord, des règles très strictes ont été données à nos hydrologues pour le tracé des hydrogrammes-types en particulier pour la séparation du ruissellement de l'écoulement de base (on se reportera au Cahier d'Hydrologie de l'ORSTOM, volume IV, n° 1, 1967), on a ensuite choisi les paramètres suivants :

- le temps de base T_b : durée totale du ruissellement superficiel,
- le temps de montée T_m : qui sépare le débit du ruissellement du débit maximal,
- le rapport $a = \frac{Q_M}{Q_m}$ du débit maximal au débit moyen du ruissellement.

L'hydrogramme standard est un hydrogramme de forme simple ayant les mêmes valeurs T_b , T_m et a et correspondant au même volume de ruissellement que l'hydrogramme-type du bassin, tel qu'il a été établi par l'analyse directe des hydrogrammes unitaires, mais dont le tracé est représenté par des expressions analytiques plus simples se prêtant à l'extension des résultats à des bassins non observés.

Pour la crue, on suppose une ligne droite ; pour la décrue, soit une branche d'exponentielle, soit une branche d'hyperbole dont les coefficients sont fonction des 3 paramètres présentés plus haut. Nous renvoyons à la publication précitée pour plus de détail. Rien ne s'oppose d'ailleurs à ce que pour certains exemples, on utilise des formes d'hydrogrammes encore plus simples, voire un triangle.

RAPPORTS PRÉCIPITATIONS-ÉCOULEMENT

La seconde partie de la mise au point du modèle concerne les rapports entre volume de ruissellement superficiel ou d'écoulement et le volume des précipitations qui l'a engendré. C'est là un problème délicat, nous l'avions abordé autrefois par l'analyse des pertes par infiltration, des essais intéressants ont été faits mais de sérieuses difficultés se sont présentées. Nous avons abandonné provisoirement cette méthode en reportant nos efforts sur l'étude des relations entre ruissellement et précipitation sans passer par l'infiltration. Il est possible que nous revenions plus tard aux capacités d'infiltration.

La méthode consiste à analyser par régressions multiples, soit la lame d'eau ruisselée H en mm,

soit le coefficient de ruissellement $K_R = \frac{H}{P}$ en %

en fonction des facteurs conditionnels qui sont généralement pour un bassin donné : la hauteur de précipitation, les conditions d'humidité antérieures qui peuvent être représentées par l'indice d'humidité, l'intensité moyenne de l'averse, l'état de la végétation (début ou fin de saison des pluies) et deux facteurs qui tiennent compte des difficultés d'adaptation d'un modèle global à certains cas : un facteur d'hétérogénéité de l'averse ou un facteur tenant compte de la position de son épiceutre. Remarquons que cette analyse est valable qu'il y ait ruissellement superficiel ou non.

On obtient une courbe principale donnant K_R en fonction de la hauteur de précipitation P (ou P utile) pour une valeur de l'indice d'humidité, de l'intensité moyenne donnée, etc. et des courbes

auxiliaires donnant les corrections à apporter pour l'indice d'humidité, l'intensité moyenne, etc. On trouvera ci-après une série de diagrammes relatifs

à des bassins représentatifs du Tchad et du Cameroun. Le plus complet concerne le Mayo Bomé au Cameroun où l'humidité du sol et la durée du

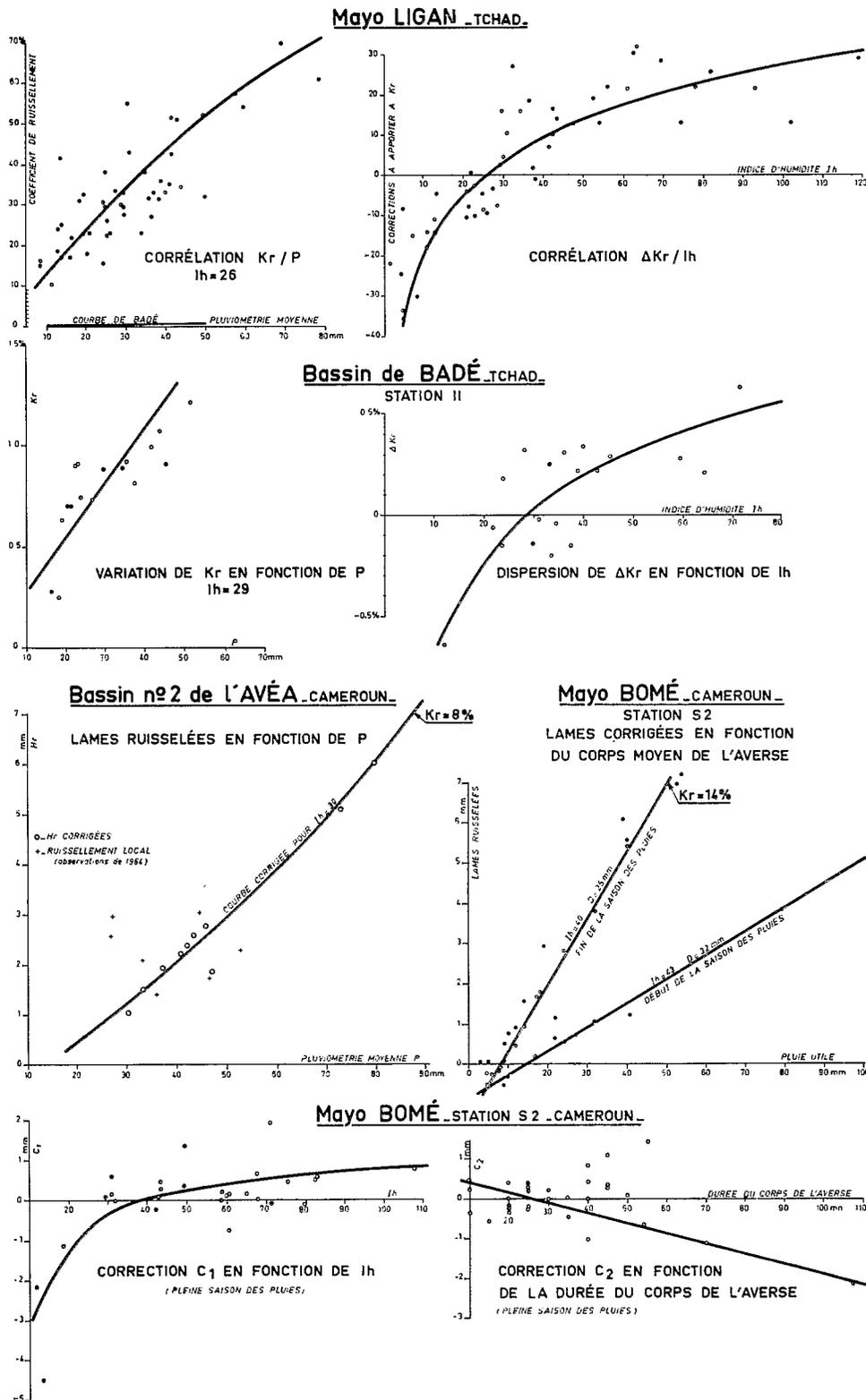


Fig. 1

corps (en relation très étroite avec l'intensité moyenne) ont été prises en compte. On constatera :

1) que ces études ont été faites avec des conditions de sol très diverses. Au Mayo Ligan, il est possible d'arriver à des coefficients de ruissellement de 80 % ; sur les sables du bassin de Badé, 2 % semblent être une limite supérieure (et là il n'y a pas de ruissellement),

2) la courbe du coefficient de ruissellement devient convexe pour les fortes valeurs de K_R par suite de l'existence de l'asymptote 100 % (en pratique 85 - 90 %),

3) que malgré le choix de formes différentes de I_h les courbes de corrections correspondant à ce facteur ont des formes voisines. Nous n'avons présenté ici que trois exemples, mais ces constatations ont déjà été faites sur plus de 20 ensembles de bassins représentatifs.

M. Brunet Moret a proposé au symposium de Budapest (1965) un autre mode d'analyse du même type, mais un peu plus complexe, où on pourrait donner le même poids dans l'analyse à l'intervalle de temps t_a à l'averse antérieure ayant donné lieu à ruissellement et à la totalité de la hauteur de précipitation depuis le début de la saison des pluies. Pour des terrains perméables et des climats pas trop arides, les résultats semblent meilleurs que par l'utilisation d'indice I_h .

On voit qu'avec l'ensemble du modèle d'averse de fréquence décennale, de l'hydrogramme standard et des régressions permettant de déterminer le volume de la crue, on peut reconstituer tous les éléments d'une crue (décennale par exemple) pour un bassin représentatif donné.

Il reste à fournir les éléments permettant de procéder à la même opération sur un bassin non jaugé ou n'ayant fait l'objet que d'observations sur une faible durée.

APPLICATIONS A DES BASSINS SANS DONNÉES HYDROMÉTRIQUES

Pour y arriver, il faut pouvoir lier les éléments du modèle présenté plus haut aux facteurs climatologiques et physiographiques des bassins ! Ceci n'a été fait jusqu'ici de façon approfondie que pour une partie du modèle des précipitations, en particulier, en ce qui concerne la hauteur et la répartition temporelle et encore uniquement pour l'Afrique Occidentale et le Tchad. Pour la forme de l'hydrogramme, les paramètres principaux sont bien mis en évidence, mais il nous reste à dégager les facteurs géomorphologiques en relation avec ces paramètres et à définir avec précision les rela-

tions. Les études sont en cours pour une première tranche d'une vingtaine de bassins représentatifs, exploités il y a quelques années. Pour la partie la plus difficile : relations hauteur-volume, on étudie non seulement les facteurs géomorphologiques, mais encore tout ce qui peut caractériser la perméabilité d'ensemble du bassin.

Ce n'est qu'à l'issue de ces recherches que l'on pourra reprendre l'ensemble de graphiques définissant le modèle global en cherchant à uniformiser, dans toute la mesure du possible, les processus de leur mise au point et en exprimant ces relations en fonction des facteurs conditionnels du bassin ; mais comme ceci demandera plusieurs années et qu'il n'est pas possible de faire attendre plus longtemps les utilisateurs, nous avons présenté une méthodologie simplifiée qui est valable pour des averses comprises entre 70 mm et 150 mm et qui a été exposée au Symposium de Budapest en 1965.

La hauteur de précipitation ponctuelle est transformée en hauteur moyenne par l'emploi du coefficient d'abattement dont nous avons donné 2 valeurs plus haut.

Le coefficient de ruissellement est donné par une série d'abaques en fonction de la superficie du bassin, d'un indice de pente R et d'un indice de perméabilité P , pour 3 types de couvertures végétales qui coïncident avec les grandes catégories de climat (P_1 , R_1 correspondent par exemple à un bassin rigoureusement imperméable, à pentes extrêmement faibles). Ces graphiques ont été établis à partir des résultats obtenus sur une soixantaine de bassins versants représentatifs.

La forme de l'hydrogramme est donnée par 2 facteurs : le temps de base et le coefficient a dont il a été question, le premier est déterminé par des ensembles de graphiques établis en fonction du paramètre R et de la surface du bassin pour chaque type de couverture végétale. Pour le second, on donne toute une série de valeurs en fonction de la superficie du bassin et, dans une certaine mesure, de la pente.

Le coefficient de ruissellement permet de calculer le volume de la crue, celui-ci divisé par le temps de base donne le débit moyen pendant l'hydrogramme de crue Q_b . La connaissance du coefficient a permet de calculer le débit maximal Q_M en fonction du débit moyen Q_m . Il reste à évaluer le débit de base provenant des nappes souterraines, débit faible devant Q_M et parfois nul pour les bassins à fort ruissellement.

Bien entendu, une reconnaissance sur le terrain est fort utile et il est préférable que les calculs soient faits par un hydrologue confirmé : le classement d'un bassin dans une catégorie P est délicat, en outre, les diagrammes supposent un réseau hydrographique pas trop différent de la moyenne

de ce que l'on rencontre dans la zone considérée; enfin, pour les valeurs faibles de la surface du bassin, lorsque la crue décennale n'est plus unitaire, le choix de a et du temps de base n'est pas si facile que semblent l'indiquer les graphiques. Il n'y aurait pas trop de difficultés à étendre cette méthodologie à des fréquences plus faibles que les fréquences décennales.

En conclusion, nous sommes déjà parvenus à certains résultats dans la méthodologie de calcul

des crues, dont l'intérêt est particulièrement évident en pays neuf. Pour obtenir des données plus précises, plus sûres et d'application plus générale, il est nécessaire d'étudier de plus près les paramètres du bassin qui régissent les relations pluie-débit ainsi que la forme des modèles de transformation, ce qui exige des recherches pédo-hydrologiques et géomorphologiques approfondies et un emploi plus fréquent des ordinateurs dans les recherches relatives aux modèles.