

OFFICE DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE OUTRE-MER
20, rue Monsieur
PARIS VII^e

COTE DE CLASSEMENT N° 943

HYDROLOGIE

METHODES DE DETERMINATION DES CRUES EXCEPTIONNELLES

par

J. RODIER

OFFICE DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE OUTRE-MER

- - - - -

SERVICE HYDROLOGIQUE

COTE DE
CLASSEMENT N° 943

HYDROLOGIE

M E T H O D E S D E D E T E R M I N A T I O N
des CRUES EXCEPTIONNELLES .

J. R O D I E R
Ingénieur en Chef à l'Électricité de France
Chargé de la direction des études hydro-
logiques de l'Office de la Recherche
Scientifique Outre-Mer.

MARS 1950

METHODES DE DETERMINATION DES CRUES EXCEPTIONNELLES

L'estimation des débits de crue exceptionnelle nécessite un certain nombre d'opérations, dont la plus importante est l'extrapolation des débits de crue connus. Pour effectuer cette opération capitale, nous n'avons pas encore trouvé de solution satisfaisante, sauf peut-être dans certains cas particuliers. On a cherché, surtout aux Etats Unis, à résoudre ce problème par une étude précise et continue des conditions d'écoulement des crues et dans le cas, peu fréquent malheureusement, où il existe sur un vaste territoire un grand nombre de pluviomètres relevés depuis de nombreuses années de façon sérieuse, on peut dire que le problème a reçu une solution à peu près satisfaisante. D'autre part, au moyen d'études sérieuses, basées sur les lois de probabilité, on a cherché à obtenir des formules générales, mais jusqu'ici les résultats obtenus sont médiocres. Toutefois, il n'est pas possible qu'en persévérant dans cette voie, on aboutisse à une formule simple qui puisse s'ajuster à la presque totalité des régimes connus.

Dans l'état actuel de nos connaissances, il a semblé utile de mettre en lumière les deux points suivants:

1°/ - les méthodes d'extrapolation dont nous disposons sont médiocres. Il faut donc chercher à ne les appliquer que dans les conditions les plus favorables; pour cela, il est essentiel de préciser que chaque formule ou chaque méthode ne s'applique qu'à des régimes fluviaux présentant les caractères d'un type bien déterminé.

2°/ - dans le même esprit, il est nécessaire de ne pas négliger les autres opérations tout aussi importantes que l'extrapolation elle-même, savoir:

- la détermination du degré de risque que l'on doit admettre dans un projet, c'est à dire le degré de probabilité de la "crue exceptionnelle du projet",
- l'étude critique des bases de l'étude,
- l'étude critique des résultats obtenus.

En effet, il ne servirait à rien d'avoir une très bonne formule d'extrapolation, si on l'appliquait à des bases erronées. De même, il arrive très fréquemment que l'on effectue de très longues études de crues exceptionnelles

correspondant à une très faible probabilité, alors que l'examen sérieux des conditions d'exploitation de l'ouvrage montrerait qu'on pourrait parfaitement tolérer un risque plus élevé.

Enfin, il est un troisième point sur lequel il serait bon d'insister. On ne peut parler de crues exceptionnelles sans se référer aux notions de probabilité: la crue dite "centenaire", par exemple, est la crue maximum ayant une chance sur 100 de se produire pendant une année. Cette définition, au point de vue pratique, semble bien arbitraire. En fait, dans une période de 100 ans, chacun sait que l'on peut rencontrer une crue millénaire, même si la valeur calculée de la crue centenaire est exacte. Dans ces conditions, un ouvrage calculé pour la crue centenaire sera détruit et la définition des débits de crue pourra donc sembler, aux non spécialistes, assez artificielle. En fait, l'étude des crues exceptionnelles a pour objet d'imposer à l'Ingénieur des règles de sécurité matérialisées par des valeurs de crues exceptionnelles centenaire, millénaire, dix-millénaire pour lesquelles il doit calculer des aménagements ou des ouvrages donnés. En toute équité, on ne doit donc pas tenir rigueur à l'Ingénieur de l'arrivée fortuite d'un événement dont la probabilité est beaucoup plus faible que celle qu'il est de règle de choisir pour le genre de risque qu'entraînerait la destruction de l'ouvrage. Dans ces conditions il semble inutile de rechercher une précision trop grande, que d'ailleurs on ne saurait atteindre dans la plupart des cas. On se contentera généralement d'ordres de grandeur et on adoptera évidemment une certaine marge de sécurité.

Les méthodes générales que l'on peut utiliser varient suivant la nature des renseignements dont on dispose et la nature des régimes à étudier. On peut distinguer trois méthodes principales:

1°) détermination directe à partir des débits de crue connus.

Cette méthode est valable lorsque les observations des débits s'étendent sur une très longue période et lorsque les crues ne présentent pas un caractère extrêmement brutal. Elle n'est donc pas à recommander pour l'étude des régimes présentant des cyclones, des typhons, des "cloud burst".

Elle s'applique généralement au cas des cours d'eau à bassin versant étendu.

2°) détermination analytique à partir des données pluviométriques.

Cette méthode est applicable lorsque la pluviométrie a fait l'objet de relevés journaliers nombreux, exacts et portant sur une longue période. Elle peut s'appliquer avec succès aux régimes à précipitations extrêmement brutales.

3°) détermination par étude comparative.

Cette méthode, beaucoup moins précise que les autres, doit être appliquée obligatoirement lorsque les relevés pluviométriques et limnimétriques sont insuffisants.

Dans chacun de ces cas, la façon d'appliquer la méthode variera suivant le régime du cours d'eau considéré. Il est possible que le régime à étudier n'admette qu'une crue annuelle durant plusieurs mois, crue dont l'importance est déterminée pratiquement par la valeur de la pluviométrie annuelle sur tout le bassin. Au contraire, on peut n'avoir à considérer que des crues dont la pointe ne dure que quelques heures: crues déterminées par des orages très brefs sur de petits bassins versants. Les principes généraux resteront les mêmes.

I - DETERMINATION DIRECTE DES DEBITS DE CRUE.-

L'application de cette méthode comporte les opérations suivantes:

- 1° - détermination du degré de probabilité de la crue exceptionnelle à considérer dans l'étude du projet. Ce degré de probabilité varie suivant la gravité des dégâts pouvant résulter des suites de cette crue.
- 2° - étude sérieuse et complète des documents pluviométriques et hydrologiques de base et du régime.
- 3° - étude sérieuse des crues exceptionnelles connues et de leurs causes. Mise au point de la courbe de fréquence.
- 4° - ajustement à la courbe de fréquence d'une formule convenable valable pour le régime considéré. Extrapolation au moyen de cette formule. Détermination de la crue de probabilité fixée au premier paragraphe.

5° - à titre de vérification, comparaison avec les crues exceptionnelles, de même probabilité; sur des bassins versants mieux connus de régime analogue.

II - METHODE ANALYTIQUE DE DETERMINATION DES DEBITS DE CRUE.-

1° - estimation du degré de probabilité de la crue contre laquelle on devra se prémunir.

2° - étude du bassin versant: pente, sol, végétation.

3° - étude des facteurs climatologiques. Etude critique des données pluviométriques.

4° - détermination de la verse de probabilité donnée, par la méthode des "stations-années" (étude des stations pluviométriques du bassin versant et des stations voisines).

5° - mise au point d'un diagramme de précipitation correspondant à l'averse donnée précisant la répartition des précipitations pendant cette averse dans le temps et dans l'espace.

6° - étude mathématique des conditions de ruissellement et d'infiltration du bassin versant au moyen de l'étude des crues résultant de quelques averses-types (méthode des "Unit-Hydrograph").

7° - au moyen des renseignements obtenus au paragraphe précédent, tracer le diagramme de débit correspondant au diagramme de précipitations établi au 5°.

8° - à titre de vérification: comparaison avec les crues exceptionnelles de même probabilité, sur des bassins versants donnés.

III - DETERMINATION PAR ETUDE COMPARATIVE.-

1° - déterminer le degré de probabilité de la crue exceptionnelle comme précédemment.

2° - Etude du bassin versant.

3° - Détermination de la crue exceptionnelle par comparaison avec les crues exceptionnelles, de même probabilité, pour des bassins versants connus.

I°- DETERMINATION DU DEGRE DE PROBABILITE DE LA CRUE
à prendre en CONSIDERATION.-

Il s'agit là d'un problème qui présente de très grandes analogies avec la détermination du taux de sécurité en résistance des matériaux. On est arrivé, d'ailleurs assez récemment, à admettre la notion "probabilité" dans les problèmes de résistance des matériaux et à tenir compte des considérations de probabilité dans la détermination du taux de sécurité. Des exemples simples peuvent faire comprendre ce point de vue:

- Une digue, qui protège quelques rizières ne comportant aucune habitation, peut être calculée sans inconvénient pour une crue à peine supérieure à une crue décennale.

- Par contre, un ouvrage dont une rupture peut entraîner l'inondation de quartiers entiers de grandes villes, doit résister à une crue de probabilité 1/10.000 à 1/20.000 (barrage de SARRANS),

Ces dernières probabilités, très faibles, correspondent dans l'esprit des Ingénieurs à une impossibilité pratique. Il semble que ce soit le cas pour l'éventualité de crues se produisant une fois sur 10.000 ou sur 100.000 ans.

En somme, plus les conséquences du dépassement de la crue prévue sont dramatiques, plus le taux de sécurité doit être élevé.

De même, le taux de sécurité doit être également d'autant plus élevé que le régime de la rivière est plus mal connu.

Il est bon d'ajouter que très fréquemment, il existe une série de marges de sécurité s'ajoutant les unes aux autres.

Par exemple, dans le cas d'un grand barrage, on calcule les évacuateurs pour un débit de crue exceptionnelle se produisant tous les 10.000 ans. Il existe une première marge de sécurité constituée par le fait que la crue exceptionnelle est laminée d'une façon très sensible par le réservoir (souvent on ne tient pas compte de cette circonstance pour la détermination de la crue exceptionnelle). Or, cette marge de sécurité est beaucoup plus grande qu'il ne semblerait à première vue. Par ailleurs, on réserve toujours au-dessus de la cote amont correspondant à l'évacuation de la crue exceptionnelle une certaine marge de hauteur qui constitue une deuxième marge de sécurité.

Enfin, la stabilité ou la résistance de certains ouvrages ont été calculées de manière à résister à une crue exceptionnelle donnée. Cette crue exceptionnelle se traduit dans le calcul de ces ouvrages par des conditions de résistance des matériaux, un certain taux de sécurité correspondant à la résistance du béton et des aciers et à une marge supplémentaire de sécurité. L'existence de ces marges de sécurité successives explique que bien des ouvrages calculés pour des crues exceptionnelles beaucoup trop faibles aient pu résister à des débits bien supérieurs.

Il est bon cependant de garder un juste équilibre et de ne pas prétexter de ces marges de sécurité pour s'imposer des débits de crue exceptionnelle trop faibles.

Le choix du taux de probabilité à admettre est extrêmement important. Un examen approfondi des répercussions de la destruction d'un ouvrage peut conduire à éviter des dépenses inutiles. Il peut conduire également, dans l'autre sens à éviter des catastrophes.

2° - ETUDE SERIEUSE & COMPLETE DES DOCUMENTS PLUVIOMETRIQUES & HYDROLOGIQUES DE BASE & DU REGIME.

Suivant le tempérament des Ingénieurs, cette partie du travail est négligée ou en constitue la seule partie utile.

Les empiriques se bornent à étudier à fond cette question et étudient un peu les crues faisant l'objet de la 2ème opération. Ils se fient alors à leur flair pour extrapoler les débits de crue connus, sans trop rechercher quelle peut être leur probabilité.

Certains, au contraire, tendent à appliquer un peu aveuglément une formule toute faite à des courbes de débits classés, sans souvent chercher à reconnaître si ces courbes correspondent à des mesures sérieuses ou non.

Ces deux excès peuvent conduire à des erreurs graves.

Il est indispensable que l'étude mathématique soit précédée d'une étude critique sérieuse des documents hydrologiques qu'on possède. Pour cela, il est indispensable de s'assurer:

- 1°) de la confiance que l'on peut accorder à la courbe d'étalonnage des stations;
- 2°) de la manière dont les hauteurs d'eau des échelles ont été relevées.

Dans cette deuxième partie, on peut très bien, dans certains cas, se dispenser d'inspecter les stations de jaugeages, travailler sur des documents écrits, à condition de procéder à de nombreux recoupements.

L'étude critique concomitante de la pluviométrie est indispensable. Enfin, bien entendu, il sera nécessaire de bien connaître tous les facteurs définissant les conditions d'écoulement dans la région considérée.

3° - ETUDE DES CRUES CONNUES.-

On s'efforcera de faire l'inventaire de toutes les crues connues, non seulement les crues relevées par les limnigraphes ou observées aux échelles limnimétriques, mais toutes les crues pour lesquelles on puisse retrouver de simples indices de hauteurs d'eau.

Les relevés des stations de jaugeages devront faire l'objet d'études critiques très poussées.

On dispose généralement, pour vérifier s'il n'existe pas d'erreur grossière, au moins de quelques relevés pluviométriques et parfois des relevés de stations de jaugeages sur les affluents secondaires et les fleuves voisins. Un point très important consiste à vérifier s'il n'y a pas eu de crues non enregistrées, simplement par le fait que le limnigraphe n'a pas fonctionné ou que le niveau de l'eau a dépassé le haut de l'échelle. Ces erreurs semblent invraisemblables. Elles sont pourtant beaucoup plus fréquentes qu'on ne le pense; on les rencontre dans de nombreux territoires mêmes équipés de stations de jaugeages bien installées. Les relevés de stations de jaugeages sur les affluents, même si les stations sont très mauvaises, peuvent fournir à ce sujet des indications précieuses. La répétition à une cadence anormale d'un même débit de crue moyenne, ou l'impression que la crue est "limitée par un plafond", indiquent des erreurs de ce genre. Il est impossible généralement de retrouver le débit des crues "oubliées", mais on peut en tenir compte pour modifier les fréquences admises pour les différentes crues.

On doit éviter de supprimer des séries entières d'années d'observations, surtout si l'on prend comme prétexte que les débits de crues semblent invraisemblables. Des erreurs de ce genre ont conduit à des catastrophes.

En dehors de ces crues relevées effectivement aux stations de jaugeages, on peut généralement recueillir des renseignements extrêmement intéressants, qu'il ne faut pas

négliger, bien qu'ils ne soient pas toujours donnés par des relevés méthodiques. On dispose généralement de beaucoup plus de données qu'il ne semblerait de prime abord, surtout lorsque la région à étudier est peuplée depuis longtemps.

Ce sont tout d'abord les relevés pluviométriques antérieurs aux observations limnimétriques, les relevés de hauteurs d'échelles non étalonnées, des marques anciennes de niveau maximum de crues, des photographies de crues, des indications d'ouvrages détruits, de zones inondées, de localités détruites, de routes coupées, la fréquence et la durée de ces coupures, les traces laissées par l'eau sur le rocher, les épaves, etc...

Enfin, on peut parfois retrouver certaines séries d'années humides par le déplacement du rivage de grands lacs intérieurs. Le cas du lac TCHAD est typique; on peut citer des exemples analogues tels que les lacs du delta intérieur du NIGER.

On cherchera à transformer ces données en débits. Cette opération peut présenter des difficultés; en particulier, la détermination du débit d'un niveau d'eau relevé lors d'une crue importante. La détermination de la hauteur obtenue est assez vague, et il faut faire l'impossible pour ne pas ajouter d'imprécisions supplémentaires. Pour cela, on peut calculer la crue par une formule d'écoulement usuelle, mais on risque de très grosses erreurs, surtout sur la détermination des pentes superficielles et du coefficient de rugosité à appliquer. Il faut se méfier également des hauteurs d'eau relevées en certains points singuliers, à proximité de seuils ou de très gros blocs de rocher.

Une bonne méthode, lorsqu'on le peut, est de rechercher à déterminer les coefficients de la formule d'écoulement par une étude expérimentale. On étudiera expérimentalement une ou plusieurs crues qui seront, bien entendu, très inférieure à la crue exceptionnelle, en notant la répartition des vitesses, les profils en travers, la nature du fond, les profils en long du lit et de la surface libre.

Il sera assez facile d'extrapoler la pente superficielle et les coefficients de rugosité à admettre dans la formule à appliquer à la hauteur exceptionnelle donnée. Le gros intérêt de la méthode est de donner un premier ordre de grandeur de la vitesse maximum obtenue. Les valeurs de cette vitesse sont souvent invraisemblables à première vue. En effet, pour les rivières à très forte pente, avec de très gros blocs, les coefficients de rugosité sont anormaux et les vitesses moyennes sont beaucoup plus faibles que celles auxquelles on pourrait s'attendre. On peut trouver 1 mètre

par seconde pour des pentes de 2 à 3%. Il est nécessaire, pour ces fortes pentes, de ne pas englober de petites cascades dans les zones à étudier.

Les meilleurs résultats obtenus par la formule d'écoulement correspondent à de grands fleuves au lit régulier et à faible pente (inférieure ou égale à 1%).

Dès que les débits de crue auront été déterminés, on en cherchera les causes par une étude serrée des conditions climatologiques qui ont déterminé ces crues et des conditions hydrologiques et climatologiques antérieures, ainsi que des autres facteurs de l'écoulement.

L'examen des conditions climatologiques et des conditions de l'écoulement au moment de chaque crue peut donner des renseignements extrêmement utiles. En particulier, il est assez difficile de se faire une idée de la probabilité de la plus forte crue connue. Or, l'examen des conditions climatologiques et des conditions d'écoulement permet de savoir si la crue a bénéficié ou non de toutes les conditions favorables.

En particulier, si cette plus forte crue a été causée par une très forte précipitation après une longue période de sécheresse, on en conclut que toutes les conditions favorables à la formation d'une crue exceptionnelle n'étaient pas réunies.

De même, on peut constater que le débit de tel ou tel affluent est resté assez faible.

On peut constater que toutes les conditions favorables ont été réunies, auquel cas la crue est d'une probabilité très faible, ou au contraire on peut constater que toutes les conditions favorables à une très forte crue n'ont pas été remplies, loin de là, et on peut en déduire que la probabilité de cette crue est plus forte qu'on aurait pu le penser au premier abord.

Après cette étude serrée de la valeur de la crue, de sa durée, des précipitations qui en sont la cause et des circonstances de l'écoulement, on peut classer les crues par ordre de probabilité en toute connaissance de cause.

4° - AJUSTEMENT à la COURBE de FREQUENCE d'une FORMULE CONVENABLE.-

Il existe de nombreux procédés connus permettant d'estimer les débits de crues exceptionnelles à partir de

données connues. En général, on cherche à appliquer des lois ou des formules plus ou moins empiriques à des phénomènes naturels. Ces procédés sont encore imparfaits et ils ont donné lieu à des mécomptes, d'autant qu'ils étaient appliqués parfois à des phénomènes insuffisamment observés; alors qu'appliqués avec discernement, ils auraient peut-être donné des résultats convenables.

Il semble que les échecs retentissants auxquels ont donné lieu la plupart de ces formules (appliquées, il est vrai, à des régimes difficiles) ont découragé les recherches dans ce sens. Les chercheurs américains ont été ainsi amenés à mettre au point la méthode des "Unit Hydrograph" dont nous parlerons plus loin et qui donne d'excellents résultats pour la plupart des fleuves des Etats-Unis, grâce à des recherches poussées et à un excellent équipement en stations de jaugeages et en pluviomètres.

Malheureusement, cette méthode n'est pas applicable dans tous les cas, surtout dans les régions dont l'équipement hydrométrique et météorologique est, ou insuffisant ou trop récent.

Il est donc du plus haut intérêt de poursuivre les études en vue de la recherche d'une loi à partir de la théorie des probabilités. Mais, même si, un jour, cette loi était trouvée, il resterait indispensable de procéder à une étude critique approfondie des données de base et du régime.

Pour le présent, nous devons nous contenter des formules existantes qu'elles aient été établies par des études purement empiriques ou à partir des théories de probabilité.

Il est alors nécessaire de choisir la formule qui semble la plus convenable au régime considéré. Pour cela, on aura intérêt, si l'on veut choisir une formule bien déterminée, à rechercher à l'occasion de l'étude de quels régimes son auteur l'a établie et à quelles applications satisfaisantes elle a donné lieu.

Il y aurait intérêt, dans l'ignorance des possibilités d'application d'une formule donnée, à effectuer tout d'abord un essai sur une rivière de régime voisin dont les crues sont bien connues.

Il semble préférable d'utiliser deux formules d'origine tout à fait différentes et de comparer les résultats obtenus.

Les méthodes dites mathématiques sont nombreuses. Nous en citerons quelques unes parmi les plus connues.

La méthode la plus simple consiste à reporter sur un graphique, en ordonnées les débits des crues observées et en abscisses les fréquences cumulées des débits de crues observés.

L'extrapolation de la courbe obtenue vers les très faibles probabilités permettra de trouver le débit de la crue exceptionnelle recherchée. La tangente à la courbe de fréquence, que nous avons ainsi tracée, est assez difficile à déterminer vers les très faibles fréquences, puisque cette courbe se rapproche beaucoup de l'axe des ordonnées, il est préférable d'adopter pour les débits et les fréquences des échelles du type logarithmique, de façon à obtenir des pentes beaucoup plus faciles à utiliser vers les faibles probabilités.

Comme on ignore la probabilité de la ou des plus fortes crues connues, on devra prendre bien soin, dans le tracé de la courbe, de ne pas trop se laisser influencer par la position du point ou des points extrêmes. C'est ici que l'analyse critique de la pluviométrie et des conditions d'écoulement vue au chapitre précédent permet de préciser la mise en place de la courbe dans cette partie du tracé qui est la seule qui nous intéresse. Cette méthode présente un inconvénient, on n'a absolument aucun renseignement sur la forme de la courbe au-delà des derniers points connus.

Les différentes formules, dont nous donnons, ci-dessous, quelques exemples pris parmi les plus connus, peuvent permettre de préciser la forme de la courbe vers les faibles probabilités de façon à réduire autant que possible les erreurs pouvant résulter de l'extrapolation.

Certaines formules ont été établies de façon purement empirique, d'autres avaient à l'origine quelques fondements mathématiques, mais pour ajuster ces dernières aux différents régimes à étudier, il a été nécessaire de leur faire subir des transformations telles, qu'en réalité, ce sont également des formules empiriques.

Parmi les nombreuses formules utilisables, nous citerons la 2ème formule de FULLER et les formules dérivées, la formule de GUMBEL et la formule de GIBBRAT-GAUSS.

La deuxième loi de FULLER:

$$Q_T = Q_1 (1 + 0,8 \log T)$$

...

devait permettre de tracer la courbe de fréquence à partir du débit de crue annuelle.

Sous cette forme, elle ne s'applique pas à de nombreux régimes hydrologiques. Il semble nécessaire, comme l'a proposé M. COUTAGNE, d'ajuster plus étroitement la courbe représentative de cette loi à la courbe de fréquence observée, en remplaçant le coefficient 0,8 par un coefficient β variable. On ajuste la formule à la courbe expérimentale pour chaque régime particulier et il est alors possible d'extrapoler sur la courbe ajustée.

Dans certains cas, il semble que la loi s'ajuste mieux en affectant la parenthèse d'un exposant variable suivant le régime étudié; mais il est bon, dans ce cas d'observer la plus grande prudence et de se garder d'ajuster de trop près la formule. Le nombre de paramètres devenant trop important, la méthode devient très souple et on peut représenter, par cette formule, des courbes de formes très variables; en particulier, on risque, pour faire passer la courbe par des points erronés, de fausser complètement toute la partie correspondant aux faibles probabilités. Pour éviter ce risque, on aura soin de comparer les valeurs des paramètres choisis à ceux obtenus, pour la même formule sur une courbe de régime analogue, mieux connus.

Dans le cas où la pointe de crue dure moins d'un jour, on devra majorer le débit obtenu Q_m , qui n'est qu'un débit moyen journalier au moyen de la 3ème loi de FULLER:

$$Q_m = Q \left(1 + \frac{2,66}{S^{0,3}} \right)$$

On aura soin de vérifier sur une crue bien connue si cette formule ne conduit pas à des résultats invraisemblables.

La loi de GUMBEL a été établie sur des bases moins empiriques que la seconde loi de FULLER. Les courbes obtenues sont d'ailleurs asymptotes aux droites de FULLER pour les très faibles probabilités.

Elle ne tient compte que des débits de crue.

Son expression est :

$$W = 1 - p - e^{-\alpha (Q-u)}$$

Grâce aux deux coefficients α et "u" on peut ajuster la courbe représentative à la courbe de fréquence observée.

Mais:

- 1° - on a reconnu que les fondements mathématiques de cette loi ne correspondent pas aux lois hydrologiques,
- 2° - il est pratiquement impossible de l'ajuster à certains régimes,
- 3° - les résultats obtenus sont dans certains cas manifestement trop faibles.

La loi de GIBRAT-GAUSS est basée sur la loi de l'effet proportionnel, qui s'applique à un grand nombre de phénomènes naturels.

On admet qu'une fonction linéaire du logarithme des débits:

$$z = a \log (q - q_0) + b \quad (1)$$

suit la loi de GAUSS:

$$F\% = \frac{100}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{z} e^{-z^2} dz \quad (2)$$

F fréquence cumulée, nombre de jours sur cent pendant lesquels le débit journalier a été supérieur ou égal à q pendant la période considérée.

On prend en considération non plus les débits de crue, mais tous les débits journaliers jusqu'aux débits d'étiage inclus.

Cette loi avait été vérifiée de façon remarquable pour certains cours d'eau de régime océanique. La courbe représentative en coordonnée gaussique définie par la transformation correspondant à l'équation (1) pour F et en coordonnée logarithmique pour les débits est bien une droite.

Mais si l'on examine de près les facteurs conditionnant les variations des précipitations et de l'écoulement, on constate qu'une partie seulement peut suivre les lois de l'effet proportionnel, ce qui infirme partiellement tout au moins, les bases théoriques de cette loi.

En fait, lorsqu'on cherche à appliquer cette loi aux régimes les plus divers, à partir de relevés limnimétriques sûrs, bien entendu, on constate:

- 1° - Pour certains régimes une bonne concordance entre répartition théorique et répartition des crues observées.

2° - Pour d'autres régimes, un ensemble de deux droites présentant des inclinaisons très comparables, le coude correspondant généralement aux débits observés au début de la crue. La droite correspondant aux débits les plus faibles conduit bien aux valeurs des coefficients prévus par la loi de GAUSS. La seconde droite conduit à des coefficients sans signification pratique, toutefois son inclinaison est analogue pour des fleuves de régime comparable.

3° - Pour certains régimes enfin, surtout les régimes à crue extrêmement brutale et irrégulière, la formule GIBRAT-GAUSS ne peut donner lieu à aucune application pratique. C'est d'autant plus regrettable que, dans ce cas, les autres formules ne donnent généralement pas des résultats plus satisfaisants. Il faut faire l'impossible, dans ce dernier cas, pour appliquer la méthode préconisée au chapitre suivant.

On notera donc, avant d'appliquer cette loi à un cours d'eau de régime déterminé, qu'il y aura lieu de vérifier si des applications en ont déjà été faites et quels ont été les résultats obtenus.

De toute façon, il semble difficile d'appliquer ces formules, si les observations hydrologiques régulières et continues ne portent pas sur une vingtaine ou une trentaine d'années au moins; les crues connues ou reconstituées portant, bien entendu, sur une bien plus longue période.

Il serait intéressant de donner un tableau complet précisant les régimes auxquels peuvent s'appliquer les différentes formules. Il a semblé que ce travail dépassait le cadre du présent rapport.

Sur la courbe de fréquence, dont le tracé a été précisé vers les faibles probabilités grâce à la formule choisie comme il a été indiqué plus haut, il est facile de trouver le débit de crue exceptionnelle dont la probabilité aura été fixée au premier paragraphe.

5° - VERIFICATION.-

Le débit de crue ainsi calculé doit être comparé à celui de cours d'eau mieux connus de régime analogue. S'il est nettement différent, il sera indispensable d'en chercher la raison par comparaison de la pluviométrie et des caractéristiques physiques du bassin versant. Il faut se montrer particulièrement vigilant lorsque le débit trouvé est nettement plus faible que le débit spécifique du bassin de référence, car dans ce domaine l'erreur par défaut est beaucoup plus grave que l'erreur par excès. Il n'est pas exclu non plus que le débit

de référence soit erroné et on fera bien de le vérifier dans le cas où la comparaison donnerait des résultats peu vraisemblables.

II - METHODE SYNTHETIQUE DE DETERMINATION DES DEBITS DE CRUE

Cette méthode est basée sur l'étude des données pluviométriques à partir desquelles on évalue les débits de crue.

Il existe un certain nombre de formules très simples comportant des coefficients ajustables, permettant de calculer des débits de crue spécifiques à partir des précipitations maximum. Ces formules n'ont pas plus de valeur que les formules du même genre qui ont été proposées pour l'étude directe des débits (formules analogues à la première formule de FULLER).

Par contre, la méthode des "Unit Hydrograph" imaginée par SHERMANN, en 1932, aux Etats-Unis, et mise au point après des études expérimentales minutieuses, présente de sérieuses garanties d'exactitude.

On cherche, par cette méthode, à analyser les facteurs provoquant une crue exceptionnelle: précipitations, conditions physiques du bassin versant. On schématise sur un diagramme de crue le mécanisme du phénomène d'après quelques crues pour lesquelles on a relevé simultanément les variations de la pluviométrie et des débits. Puis, à partir de diagramme de crue type (Unit Hydrograph) et d'une averse de probabilité fixée en fonction du risque à courir, on reconstitue le diagramme de crue correspondant à cette averse et l'on obtient ainsi la crue exceptionnelle cherchée.

Dans cette méthode, on remplace la recherche directe de la crue exceptionnelle par celle de l'averse exceptionnelle.

Pour le cas où il existe de nombreuses stations bien observées, cette méthode présente les avantages suivants:

1° - la période des observations pluviométriques est généralement plus longue que la période des observations limnimétriques;

2° - la pluviométrie est soumise à beaucoup moins de variables aléatoires que les débits, puisque, pour ceux-ci on doit considérer en plus des caractéristiques pluviométriques, les caractéristiques du bassin versant au moment

de l'averse. Il en résulte que s'il est difficile de parler de régimes hydrologiques identiques, on peut concevoir facilement que, sur une certaine étendue, plusieurs stations pluviométriques présentent exactement le même régime.

Par suite, on peut pallier la faible durée des observations par le nombre des stations, autrement dit, on peut admettre, pour la détermination des fréquences d'averses, que cinq stations, dont la période d'observations est 20 ans, sont équivalentes à une station pour laquelle la période d'observations est de 100 ans. C'est la méthode des "stations années". Il est donc possible de disposer, pour une station fictive, d'une période d'observations de plusieurs centaines d'années.

On conçoit que, sous réserve de certaines conditions à remplir que nous préciserons plus loin, on peut déterminer l'averse centenaire avec beaucoup de précision et de sûreté.

Par contre, on ignore le degré de probabilité de la crue exceptionnelle que l'on détermine. On sait simplement qu'elle est de probabilité plus faible que l'averse susceptible de la provoquer; par le choix des valeurs des facteurs de l'écoulement, on doit même arriver, dans la plupart des cas, à une crue de probabilité pratiquement nulle. C'est d'ailleurs sans grand inconvénient, car cette méthode est surtout utilisée pour la recherche des crues exceptionnelles de probabilité extrêmement faible.

Le mode opératoire est le suivant:

1°) Estimation du degré de probabilité de la crue.

La probabilité choisie permettra de déterminer la probabilité de l'averse exceptionnelle à considérer, elle influera, de façon qualitative, sur le choix de la répartition des pluies dans le temps et dans l'espace et dans l'étude du coefficient d'infiltration et des conditions générales de l'écoulement. Bien entendu, pour les très faibles probabilités, on adoptera les conclusions les plus défavorables. On voit ici que le degré de probabilité joue un rôle moins net que dans la méthode précédente, en apparence tout au moins. Car, dans la méthode précédente, la probabilité de crue intervient pour fixer le point de la courbe de fréquence que l'on devra choisir. Or, si l'abscisse de ce point (probabilité) est bien déterminée, son ordonnée (débit) l'est beaucoup moins car la forme de la courbe de fréquence des débits, même précisée par les formules vues plus haut, reste assez vague en réalité.

2°) Etude du bassin versant -

Cette étude est absolument essentielle pour la suite des opérations, en particulier pour la délimitation des bassins versants, la construction des isohyètes, la répartition géographique des aires que peut représenter chaque pluviomètre, la détermination des coefficients d'infiltration. On observera soigneusement le relief, les profils en long des rivières, la couverture végétale du sol, sa perméabilité, les nappes aquifères.

3°) Etude des facteurs climatologiques -

La plupart des facteurs climatologiques sont à considérer, en particulier la direction du vent par rapport au réseau hydrographique, les causes déterminantes des fortes précipitations. La pluviométrie, à l'intérieur et au voisinage du bassin versant à étudier, devra faire l'objet d'une étude critique très sérieuse. Il faut avoir l'assurance que les précipitations journalières ont été relevées sérieusement pendant toute la période d'observations, car elles serviront de base à l'étude et si ces données s'avéraient insuffisantes, il serait nécessaire, dans bien des cas, d'abandonner la méthode.

L'étude de la variation des écarts entre les chiffres relevés et la moyenne permet de vérifier si, dans l'ensemble, les observations sont vraisemblables.

Pour certains chiffres isolés qui semblent suspects, la comparaison entre les précipitations du même jour aux diverses stations et les divers facteurs météorologiques conditionnant la pluie peut permettre d'effectuer les vérifications qui s'imposent.

4°) Détermination de l'averse de probabilité cherchée -

Le degré de probabilité de l'averse n'est pas le degré de probabilité fixé au 1er paragraphe. Il est plus fort. Il vaut mieux parfois pour l'étude des précipitations adopter un degré de probabilité un peu trop élevé (averse centenaire, par exemple, qui est facile à déterminer), et à titre de compensation, imposer des conditions de répartition des pluies très sévères, et dans la zone des valeurs d'infiltration possible les valeurs les plus défavorables.

On déterminera l'averse de probabilité cherchée par la méthode des "stations-années".

Le principe est le suivant: on classe, sans tenir compte de leur origine, les précipitations par ordre de valeur décroissante et on procède, pour déterminer l'averse de probabilité cherchée exactement comme si l'on se trouvait en présence d'une seule station, dont la période d'observations serait égale à la somme des périodes d'observations réelles.

Mais cette méthode n'est applicable que dans les conditions suivantes:

a) Les régimes pluviométriques des stations doivent être les mêmes particulièrement le régime des précipitations exceptionnelles.

b) Les averses observées à deux stations voisines doivent être indépendantes. Sinon, on conçoit qu'il suffirait, à la limite, de reproduire 5 fois les résultats d'une seule station, pour multiplier par cinq la durée de la période d'observations, ce qui n'aurait pas de sens. Cette condition impose aux stations d'être suffisamment espacées.

c) La durée de la période d'observations réelle doit être assez longue. On envisage généralement des périodes de 30 ans au moins. Cette durée est peut-être trop courte dans certains cas. En effet, il peut survenir une série d'années à très fortes averses non comprises dans la période d'observations; on obtiendrait alors des résultats trop faibles. On cherchera à vérifier s'il n'existe pas une telle série.

Dans le même ordre d'idée, il est bon de vérifier que le climat ne subit pas une variation relativement rapide. Dans certaines régions du SOUDAN; il semble que certaines variations se font presque à l'échelle humaine.

Ces trois conditions sont très importantes. Si elles n'étaient pas vérifiées, la détermination de l'averse d'une probabilité donnée pourrait conduire à une impression de fausse sécurité, dangereuse.

En pratique, l'application de la méthode est un peu moins simple que ne le laisserait supposer ce très court exposé.

La méthode des "stations-années" donne l'intensité d'une averse susceptible de se produire à une fréquence donnée à une station donnée. Ce qu'il est utile de connaître, c'est

l'intensité moyenne d'une averse susceptible de se produire sur un bassin versant de surface donnée. On voit immédiatement, que, pour la même valeur de la fréquence, l'intensité sera plus faible.

La correction qui s'impose peut être effectuée, soit par l'utilisation d'abaques établis à cet effet, soit, pour le cas où ces abaques n'existent pas, par la comparaison des précipitations à des stations voisines lors d'une même averse.

Une autre correction résulte du fait que généralement on ne dispose pas de pluviomètres enregistreurs, par suite les durées des averses données par les relevés comprennent un nombre entier de jours et sont toujours trop fortes.

Ayant déterminé la hauteur totale de l'averse de probabilité donnée, il nous reste à préciser la répartition des précipitations dans le temps et dans l'espace.

5°) Mise au point d'un diagramme des précipitations -

La répartition géographique des précipitations sera représentée par un réseau d'isohyètes et la répartition dans le temps par un diagramme-type de précipitations que, pour simplifier, on supposera de forme semblable pour toute l'étendue du bassin versant (on peut d'ailleurs compliquer le problème en étudiant isolément les crues sur plusieurs parties du bassin versant).

On sera guidé dans le choix de la répartition des précipitations par l'étude d'averses bien connues. Il faut éviter le choix de répartitions trop favorables, comme le choix de répartitions absolument improbables. Il sera nécessaire alors de se reporter aux raisons qui ont présidé à la détermination du degré de probabilité de la crue exceptionnelle; on verra alors s'il y a lieu d'adopter une répartition optimiste ou non.

Quelques essais, suivant les principes exposés aux paragraphes permettront de préciser d'ailleurs dans quelle mesure les changements de répartition influent sur le débit maximum de crue.

6°) Détermination du diagramme de crue type -

La solution la plus logique consisterait à effectuer une étude analytique de l'écoulement, à déterminer l'action de tous les facteurs pris isolément et étudier leur interaction.

La connaissance précise des lois de l'écoulement ne nous le permet pas encore, mais il est possible, par l'observation simultanée des diagrammes de précipitations et des diagrammes de débits correspondant à ces précipitations de déterminer de façon globale l'influence des divers facteurs de l'écoulement. C'est la méthode des diagrammes types ou "Unit Hydrograph" imaginée par SHERMANN en 1932.

Cette méthode repose sur un certain nombre d'hypothèses sensiblement vérifiées dans la nature:

1° - Pour toute averse de durée inférieure à la durée critique, la période de ruissellement superficiel est constante et indépendante de l'intensité des précipitations.

2° - Si l'on porte sur un diagramme les variations du débit de ruissellement à l'extrémité aval du bassin versant en fonction du temps (après déduction des apports provenant des nappes aquifères) on obtient, pour des averses de durée inférieure à la durée critique et d'intensité différente, des courbes homothétiques.

Soit "R" l'excès des précipitations sur les quantités d'eau perdues par infiltration et par évaporation, le rapport d'homothétie des ordonnées de deux courbes de débits correspondant à deux averses 1 et 2 est égal au rapport $\frac{R_1}{R_2}$ des valeurs de R calculées pour ces deux averses.

Par ailleurs, la durée critique est sensiblement égale au temps écoulé entre le début effectif de l'averse et l'arrivée de la pointe de crue correspondante, à l'extrémité aval du bassin versant.

On supposera l'évaporation nulle et le débit provenant des nappes aquifères variant linéairement entre le début et la fin de l'averse.

La quantité d'eau perdue par infiltration sera déterminée en comparant, pour une ou mieux plusieurs averses connues, le volume d'eau fourni par l'averse au volume d'eau de ruissellement déterminé par l'étude des variations des débits, après soustraction des débits provenant des nappes aquifères. La différence entre ces deux volumes correspond à la quantité d'eau d'infiltration.

...

...

Il est recommandé de chercher la valeur de l'infiltration non seulement sur des crues moyennes, mais également pour des fortes crues et de longue durée. On décompose, dans ce dernier cas, la période de précipitations en plusieurs périodes de durée inférieure à la durée critique et on additionne, heure par heure, les débits obtenus provenant des diverses averses.

De même que l'on a déterminé des valeurs moyennes de l'infiltration, on déterminera un diagramme moyen de ruissellement pour un volume unitaire de ruissellement (infiltration déduite), ou diagramme-type (Unit Hydrograph).

Aux Etats-Unis, où des études analytiques très sérieuses ont pu être effectuées, il est possible de déterminer ces caractéristiques par des formules ou des graphiques. Il serait imprudent d'utiliser ces graphiques pour des régimes autres que ceux pour lesquels ils ont été étudiés.

7°) Détermination de la crue exceptionnelle -

S'il y a lieu, on décompose le diagramme de l'averse que l'on aura choisie en averses élémentaires de durée inférieure à la durée critique et pour chaque averse on détermine la courbe de débit élémentaire correspondante suivant la méthode des "Unit Hydrograph".

Des diagrammes élémentaires de précipitations, on déduit les valeurs de la capacité d'infiltration, les valeurs de R et, grâce au diagramme-type, les diagrammes élémentaires. Ceux-ci permettent d'établir la courbe de débit de crue exceptionnelle, dont le maximum est le débit cherché.

8°) A titre de vérification, on procédera à tous les recoupements utiles, dans les mêmes conditions que pour la première méthode.

III - ETUDES COMPARATIVES.-

Les méthodes précédentes ne s'appliquent pas aux cas suivants:

1° - Rivières extrêmement irrégulières, pour lesquelles on ne dispose pas de renseignements pluviométriques suffisants pour appliquer la seconde méthode.

2° - Rivières pour lesquelles on ne possède ni renseignements pluviométriques, ni relevés de débits portant sur des périodes assez longues.

3° - On peut rattacher à ce cas celui des cours d'eau coulant au milieu de gorges étroites en terrains meubles, dont les flancs sont susceptibles de s'ébouler lors des précipitations exceptionnelles et de créer des barrages temporaires. La rupture de ces barrages peut créer des crues extrêmement brutales.

Dans les deux premiers cas, on étudiera le régime des pluies et des débits avec le peu d'éléments dont on disposera, en s'attachant tout particulièrement aux crues pour lesquelles on retrouvera au moins des délaissés sur les berges. L'étude du régime, en dehors de toute crue importante, est insuffisante.

On pourra, après cette étude, classer le régime hydrologique à étudier parmi les régimes les plus voisins et on adoptera les mêmes crues exceptionnelles avec un large coefficient de sécurité.

On pourra utiliser, à cet effet, des tableaux de débits de crues exceptionnelles, tels que celui que nous donnons en annexe.

Quant au 3ème cas, les débits de crue exceptionnelle sont pratiquement imprévisibles. On vérifiera tout d'abord si la rivière à étudier est ou n'est pas de ce type et, dans l'affirmative, on adoptera des débits spécifiques de crue très élevés, de l'ordre de 30 m³/sec/km². Il ne s'agit d'ailleurs, en général, que de petits bassins versants: de quelques dizaines à quelques centaines de km².

La troisième méthode peut être utilisée, pour la détermination très rapide d'un ordre de grandeur de la crue.

CONCLUSION.-

L'estimation des débits de crue exceptionnelle est une opération longue et minutieuse, où l'Ingénieur doit être constamment à l'affût d'une erreur des différents observateurs dont il utilise les travaux. A toutes les phases de l'étude, il doit chercher à étayer ses déductions sur des observations réelles, et n'avoir recours aux abaques tout faits qu'avec la plus grande prudence.

Il doit parfaitement se rendre compte des responsabilités qu'il prend chaque fois qu'il doit choisir une valeur de coefficient ou une courbe moyenne donnée, surtout dans la méthode des "Unit Hydrograph".

Cette étude est très souvent gênée par le manque d'études systématiques et le manque de renseignements sérieux.

Il serait souhaitable:

a) de multiplier le nombre de pluviomètre dans certains territoires mal connus, et le nombre de stations de jaugeages, à condition, bien entendu, que les instruments puissent être relevés régulièrement et sérieusement.

b) de poursuivre les études d'écoulement par des aménagements de petits bassins versants expérimentaux et par de nombreuses analyses hydrologiques dans les régions où ce genre d'études a encore été très peu pratiqué.

c) de persévérer dans la recherche des lois et probabilité qui régissent les débits en s'appuyant sur des résultats expérimentaux de plus en plus nombreux et de plus en plus détaillés.

La poursuite de ces études nécessite des crédits relativement modestes, absolument négligeables en regard des conséquences que peut entraîner une crue exceptionnelle imprévue.

J. RODIER

Cours d'eau et lieu	Débit de crue: en m ³ / sec.	Bassin: versant: en km ²	Débit spéci- fig. en: l/s/km ²	Date de la crue	Proba- bilité:	Régime
SEINE à Paris	2.650	44.000	60	Janv.1910	1/1000	Pluvial océanique
SAONE à Lyon	4.250	29.900	142	Nov.1840	1/100	" "
MOSELLE à Epi- nal	1.100	1.100	100	Déc.1947	1/50	" "
LOIRE au Bec d'Allier	9.750	32.500	300	Oct.1846	1/100	Pluvio-nival océanique
AIN à Bolozon	2.200	2.692	825	Déc.1918	1/50	" "
DORDOGNE à Ar- gentat	2.650	4.400	600	Mars 1833	1/200	" "
CERE à Laro- quebront	560	746	750	Oct.1907	1/50	" "
MARONNE aux Estourocs	251	591	424	Nov.1922	1/50	" "
BES Confluent de Truyère	370	352,5	1.050	Mars 1927	1/50	" "
TARN à Montau- ban	6.500	10.000	650	Mars 1930	1/200	" "
ARDECHE à Au- benas	3.500	460	7.600	1890		" méditerranée
TECH à Puig- Rodon	2.700	200	13.500	Oct.1940	1/200	" " "
CANIDELL à Prats-de-Melle:	550	11,6	47.500	Oct.1940	1/200	" " "
DURANCE à Mirabeau	5.000	11.917	420	-		Nivo-pluvial méditerranéen
ISERE à Greno- ble	1.900	5.720	330	Nov.1859	1/100	Nival de montagne
GARONNE à Tou- louse	8.000	10.000	800	Juin 1875	1/200	Nival de transition

RHIN à Emmerich:	12.000	160000	75	-	:	:	Pluvial océanique glaciaire
RHONE à Donzère	10.000	69.000	145	-	:	1/100	
ELBE headwaters	1.000	52	19.200	Juil.1927	:		Pluvio-nival conti- nental
DANUBE à Vienne:	14.000	102000	137	150	:	1/1000	Nivo-pluvial
ORBA à Martina (Italie)	970	47,5	20.500	Août 1935	:		Pluvio-nival médi- terranéen
VOLGA à Corki	38.000	478750	79,5	Mai 1926	:		Nival de plaine
YANG-TSE-KIANG	85.000	2850000	30	-	:		Pluvial tropical (nivo-glaciaire)
IRRAOUADY	54.000	360000	150	-	:		" "
GANGE	51.000	950.000	53,8	-	:		" "
CHENAB à Mera- rala (Indes)	19.400	28.800	675	Sept. 1928	:		Nivo-glaciaire (& pluvial tropical)
SARDA (Indes)	15.000	15.000	1.000	Sept.1924	:		" "
GAGAYAN (Philippines)	27.800	10.600	2.620	Déc.1936	:		Pluvial tropical
KANEOHE à Oahu (Hawaï)	310	13,75	22.500	Janv.1921	:		" "
MANOA à Oahu (Hawaï)	92	2,6	35.600	Janv. 1921	:		" "
BRAS de la PLAF NE(I.d.l.Réunion)	1.100	100	11.000	Janv. 1948	:	1/50	Pluvial tropical (cyclone)
DELAWARE à Riegeisville	7.800	12.800	610	Oct.1903	:		Pluvio-nival continental
POTOMAC à Cain Bridge:	11.300	30.000	380	Mars 1936	:		" "
SUSQUEHANNA à Harrisburg	22.500	62.300	360	" "	:		" "

TENNESSEE à Florence	:12.500:	80.000:	158	:Mar.1897:		:Pluvio-nival : continental
LITTLE RIVER à Pigeon (Tennessee)	:127:	1.035:	122000:	30/8/1940		: " "
OHIO à Caire	:39.500:	530000:	105	:Fév.1937:		:Pluvio-nival océan
MISSISSIPPI à St Louis	:36.800:	1820000:	13	:Juin 1944		:Nivo-pluvial : continental
COLORADO Confluent de la Gila(Arizona)	:6.650:	585000:	11,5	:Janv. 1916		
RIO SECO (Texas)	:6.500:	393:	16.400:	Mai 1935:		
AMAZONE à Obides	:193000:	5000000:	38,6	: -		:Pluvial tropical : & équatorial
FITZROY (Australie)	:17.400:	150000:	116	:Fév.1896:		:Pluvial tropical
NIGER à Koulikoro	:10.000:	120000:	83,5	:Sept.1925:	1/30	: " "
MILO à Kankan	:1.070:	9.000:	120	:Sept.1926:	1/30	: " "
ATBARA à Athara (Soudan anglo-égypt.)	:4.500:	200000:	22,5	:Août 1946		: " "
CONGO à Brazzaville	:75.000:	3600000:	20,8	: -	1.50:	: Equatorial