

L'INFLUENCE D'UNE
GRANDE RETENUE SUR LA
FORMATION DES CRUES
EXEMPLE DU RIO NEGRO
(URUGUAY)



O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire
N° : 33292, ex 1
Cote : B

L'INFLUENCE D'UNE
GRANDE RETENUE SUR LA
FORMATION DES CRUES
EXEMPLE DU RIO NEGRO
(URUGUAY)

PAR

P. DUBREUIL

INGÉNIEUR-HYDROLOGUE

MAÎTRE DE RECHERCHES A L'O.R.S.T.O.M.

L'INFLUENCE D'UNE GRANDE RETENUE SUR LA FORMATION DES CRUES

Situé entre les parallèles 31° et 34° Sud, le bassin du Rio Negro d'Uruguay est soumis à un climat de caractère subtropical à influence maritime.

Bien que les saisons thermiques d'hiver et d'été soient bien tranchées et qu'apparemment il pleuve *en moyenne* 70 à 130 mm chaque mois, soit 1 000 à 1 200 mm par an, *le régime des précipitations est extrêmement irrégulier* : des pluies intenses et durables, comme de longues sécheresses, peuvent survenir à n'importe quelle période de l'année.

Drainant un bassin versant reposant partie sur le *socle cristallin*, partie sur des *dépôts sédimentaires* (sables, argiles et grès), et dont le manteau superficiel est formé de sols peu épais et assez imperméables que recouvre une végétation herbacée soumise à un pâturage intensif, le Rio Negro a un régime violent en période de pluies, mais ne dispose que de faibles réserves pour alimenter son débit de base lors des sécheresses. La superficie totale du bassin est de 71 000 km² environ dont les 40 000 km² de la partie amont nord-ouest alimentent le grand barrage de Rincon del Bonete. Le régime hydrologique à cette station est assez bien connu par des observations régulières remontant à 1905 :

- hautes eaux hivernales de juin à octobre (750 à 880 m³/s par mois en moyenne),
- basses eaux estivales en janvier-février (130 à 170 m³/s par mois en moyenne),
- module moyen annuel de 525 m³/s, soit 13 l/s/km² de module spécifique (intervalle de confiance à 90% : 455 et 595 m³/s),
- irrégularité interannuelle élevée; modules de fréquences décennales égaux à 1 000 et 150 m³/s et coefficient de variation égal à 0,59.

Depuis 1945, l'aménagement hydroélectrique de Rincon del Bonete, d'une puissance d'environ 110 000 kW, utilise les eaux du cours supérieur du Rio Negro

qui sont emmagasinées dans un réservoir dont la capacité totale est de l'ordre de 14 milliards de m³. En avril 1959, une succession de fortes précipitations sur le haut bassin occasionna une crue d'une telle ampleur que la retenue fut remplie et déborda sur la crête du barrage; le déversoir, calculé pour évacuer 5 500 m³/s à la cote maximale admissible, ne put suffire à évacuer les eaux. Celles-ci quittèrent en outre la retenue par deux petits cols. Pour éviter la rupture du barrage, l'usine en aval étant déjà noyée, on fit sauter une digue latérale.

La catastrophe passée, on s'interrogea sur ses origines. Le premier travail fut de calculer tant bien que mal le débit de cette crue exceptionnelle à partir des courbes de remplissage de la retenue et des estimations les plus vraisemblables quant aux divers déversements. Selon les hypothèses retenues, les hydrauliciens trouvèrent que le total des débits déversés avait atteint un maximum journalier de 8 800 à 10 800 m³/s et que, de même, les apports à la retenue furent au maximum de 15 400 à 18 000 m³/s (débit moyen en 24 heures). Nous avons



Paysage typique de la pampa uruguayenne

EXEMPLE DU RIO NEGRO (URUGUAY)

par

P. DUBREUIL

*Ingénieur Hydrologue
Maître de Recherches à l'O.R.S.T.O.M.*

adopté pour notre part, et après vérifications, les limites inférieures ci-dessus comme les plus vraisemblables.

Pour le Rio Negro drainant, nous l'avons dit, 40 000 km² de plaines et de collines à faible relief, couvertes d'une végétation herbacée, un débit maximal en 24 heures de 15 400 m³/s représentait une valeur extraordinaire, inexplicable semble-t-il.

En effet, de 1908 à 1945 les observations faisaient état de 83 crues supérieures à 1 500 m³/s, dont les trois plus fortes se classaient entre 5 000 et 5 500 m³/s.

Le projet de Bonete, dressé avant 1940, prévoyait une crue millénaire de 9 000 m³/s. Après la dernière guerre, avec le développement des connaissances hydrologiques, des spécialistes américains et uruguayens en vinrent à craindre une sous-estimation de cette crue millénaire et opinèrent pour une valeur s'approchant de 12 000 m³/s.

Malgré cela, la crue d'avril 1959 avec 15 400 m³/s restait hors des limites admises et quasi inexplicable, sinon comme un cataclysme d'une très rare fréquence.

Nous signalons tout de suite que le fossé qui sépare les crues de 5 500 m³/s de celle de 15 000 m³/s n'est qu'apparent. En effet, on connaît, dans la période précédant 1908, deux crues bien supérieures à 5 500 m³/s

dont l'une surtout, celle de 1888, a dû atteindre près de 8 000 m³/s au maximum.

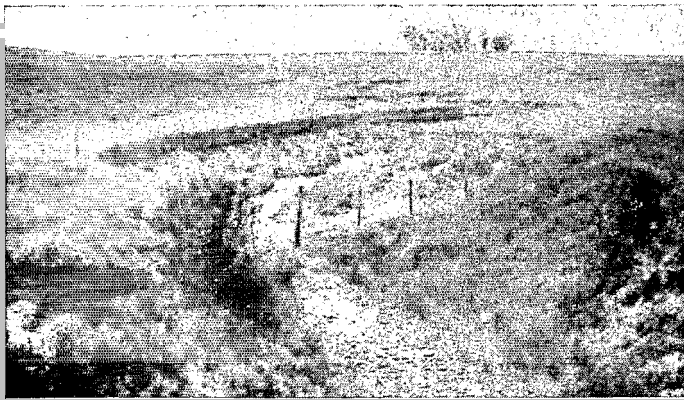
En outre, depuis 1945, bien que les relevés des niveaux du réservoir de Bonete ne soient pas systématiquement traduits en débits journaliers, les quelques sondages que nous avons faits révèlent plusieurs crues ayant dépassé 5 500 m³/s.

Ainsi a-t-on déjà l'intuition que les crues supérieures à 5 500 m³/s ne sont peut-être pas d'une fréquence exceptionnelle, celle de 1959 mise à part, et qu'elles se produisent plus fréquemment depuis 1945 qu'avant.

En 1961, dans le cadre de la SOFRELEC à laquelle était confiée par la U.T.E. (1) l'étude de l'avant-projet d'aménagement hydroélectrique du cours inférieur du Rio Negro, nous avons été chargé de reprendre la détermination de la crue maximale à prévoir sur le Rio Negro à Bonete, les modifications à apporter à l'aménagement dépendant de nos conclusions.

Nous avons commencé par une analyse qualitative des principales crues connues depuis 1908 et des précipitations qui en étaient responsables. Cette analyse nous a montré le mécanisme générateur des fortes crues en Uruguay. Les grandes précipitations y résultent du passage de dépressions thermiques affectant l'Uruguay durant 2 à 5 jours; ces pluies ont une grande extension spatiale: plus de 100 000 km² bien souvent. A Bonete, avant la construction du barrage, à une impulsion élémentaire de cet ordre répondait une crue culminant 10 à 15 jours plus tard et dont l'écoulement pouvait durer 40 jours.

De telles phases pluvieuses surviennent généralement isolées; mais on peut observer cependant la succession de 4 à 5 d'entre elles pendant trois semaines environ, ce qui provoque une série d'intumescences qui vont se chevaucher et conduire à une forte crue complexe et polygénique.



Formation d'un thalweg d'érosion en tête de bassin

(1) Société Nationale des Usines Electriques et des Téléphones de l'Etat en Uruguay.

Telles furent les causes des crues supérieures à 5 000 m³/s entre 1908 et 1945; telles semblent être *a priori* les causes du paroxysme d'avril 1959.

A ce stade de nos investigations, il était évident qu'une étude statistique directe des crues serait inutile et que, seule, l'approche du phénomène par les précipitations pouvait permettre de comprendre la crue d'avril 1959 et peut-être d'en préciser la fréquence. En outre, la retenue de Bonete semblait jouer un rôle aggravateur sur les débits maximaux de crue qu'il importait de mettre à jour.

L'homogénéité spatiale des précipitations et du bassin versant nous permettait d'appliquer la méthode de l'hydrogramme synthétique à la reconstitution des crues, en employant les procédés développés en France par M. LARRIEU.

Nous avons adopté le schéma de recherches suivant pour la poursuite de notre travail :

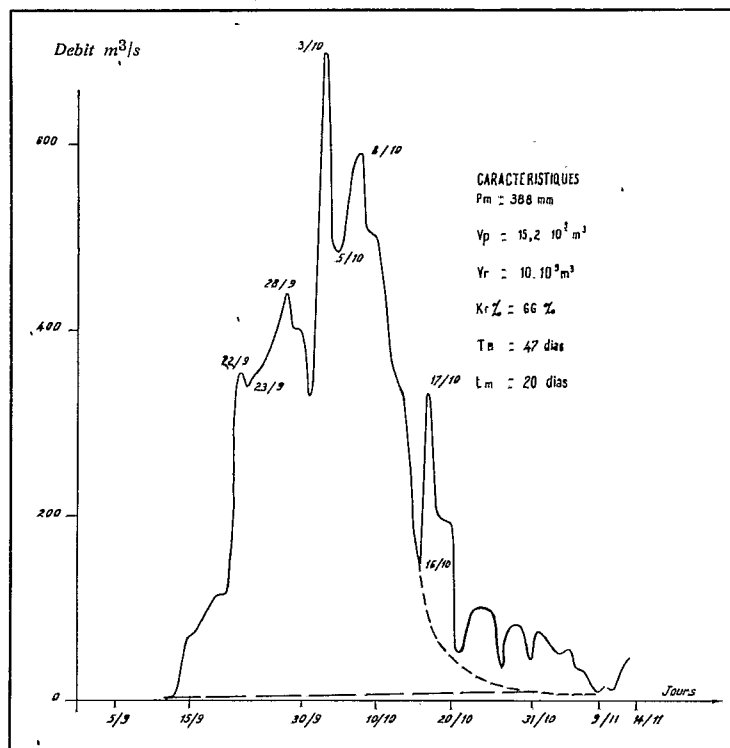
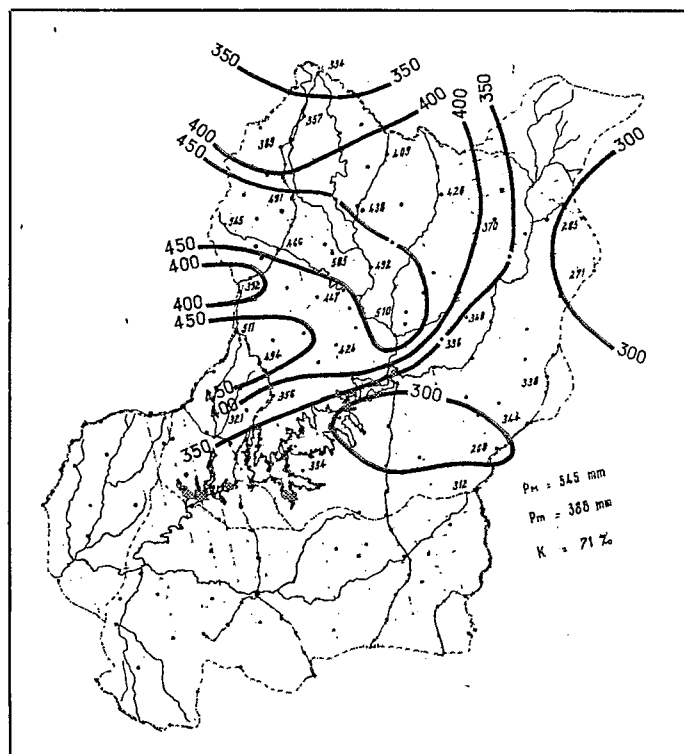
1) Reconstitution d'une forte crue survenue depuis 1945, à partir des précipitations et à l'aide de la méthode de l'hydrogramme synthétique.

2) Application de cette méthode, ainsi mise au point, sur une séquence pluvieuse comparable à la précédente, mais survenue avant 1945.

3) Reconstitution de la crue d'avril 1959 dans les conditions où elle s'est produite et dans l'hypothèse de réalisation de l'événement avant la construction du barrage.

Nous allons entrer un peu dans le détail de ces trois phases de notre étude.

COURBES ISOYETES POUR LA PÉRIODE DU 14 SEPTEMBRE AU 8 OCTOBRE 1956



CRUE DE SEPTEMBRE ET OCTOBRE 1956

Reconstitution de la crue d'octobre 1956

Il s'agit d'une crue de 7 000 m³/s provoquée par le passage successif de trois phases pluvieuses de 3,3 et 5 jours avec des accalmies de 5 et 9 jours entre elles. Au total, il tomba 388 mm en 23 jours dont 66 % ruisselèrent.

Nous avons effectué plusieurs essais afin d'ajuster au mieux les variables de la méthode de l'hydrogramme synthétique :

- les coefficients d'écoulement et leur variation journalière en fonction de la saturation des terrains et de l'importance des pluies,
- les coefficients de modulation de la forme des hydrogrammes élémentaires en provenance des diverses zones isochrones.

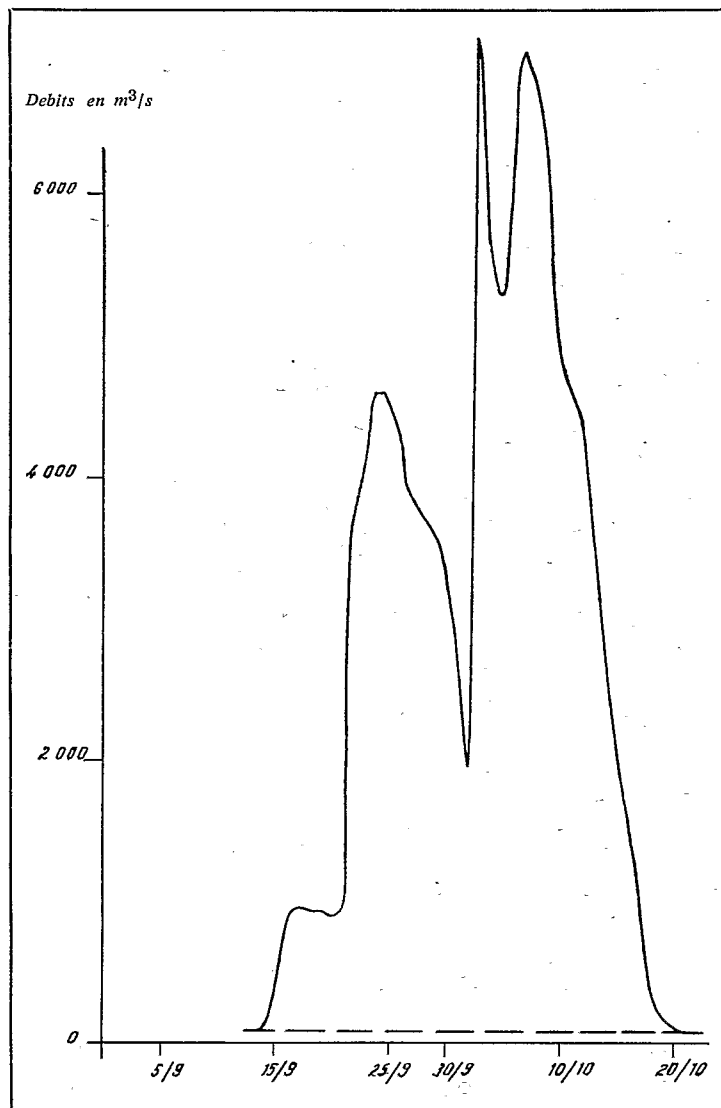
On verra sur les graphiques joints, d'une part, le tracé des courbes isochrones, la crue d'octobre 1956 et son hydrogramme reconstitué qui sont assez comparables, d'autre part.

Reconstitution de la crue de septembre 1918

Les origines pluvieuses sont du même type que celles de la crue de 1956 : 3 phases pluvieuses de 4,4 et 2 jours, séparées par des accalmies de 5 et 4 jours.

Il est tombé 342 mm en 19 jours dont la répartition sur le bassin est très voisine de celle des pluies de 1956. Il y eut 79% de ruissellement et un débit maximal de 5 480 m³/s.

HYDROGRAMME SYNTHÉTIQUE DE LA CRUE DE SEPTEMBRE ET OCTOBRE 1956



Nous avons appliqué à ce phénomène la méthode de l'hydrogramme synthétique avec les mêmes valeurs des variables calculées pour la crue de 1956. Les conditions étaient donc celles du Rio Negro avec retenue à Bonete. Les conclusions sont nettes. Par rapport à l'hydrogramme réel observé en 1918, l'hydrogramme synthétique calculé présente les modifications suivantes :

- a) réduction du temps de ruissellement de 45 à 32 jours,
- b) avancement de 7 jours de la date du maximum,
- c) aggravation du débit de pointe qui passe de 5 480 à 8 000 m³/s; si ce dernier débit ne doit être considéré que comme une approximation à 15% près, il n'en reste pas moins que le débit de pointe apparaît majoré de 20 à 25% par la présence de la retenue de Bonete.

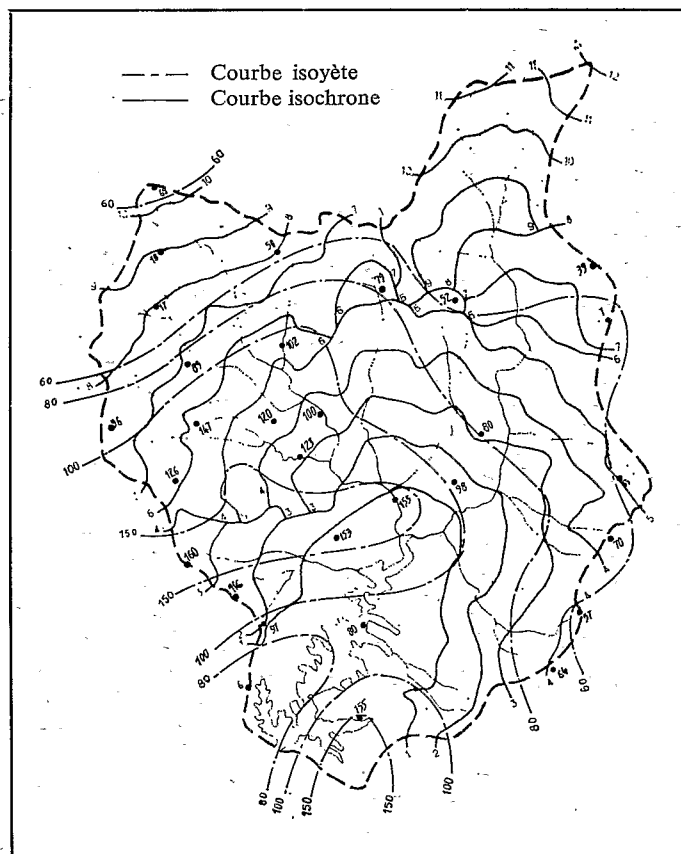
Ces conclusions méritaient d'être vérifiées avant d'être définitivement adoptées. Pour cela, il nous a paru judicieux d'entreprendre le calcul de la crue à partir des précipitations, mais dans les conditions naturelles de 1918, c'est-à-dire sans retenue à Bonete. Cette situation exigeait, comme modification essentielle, celle du tracé du

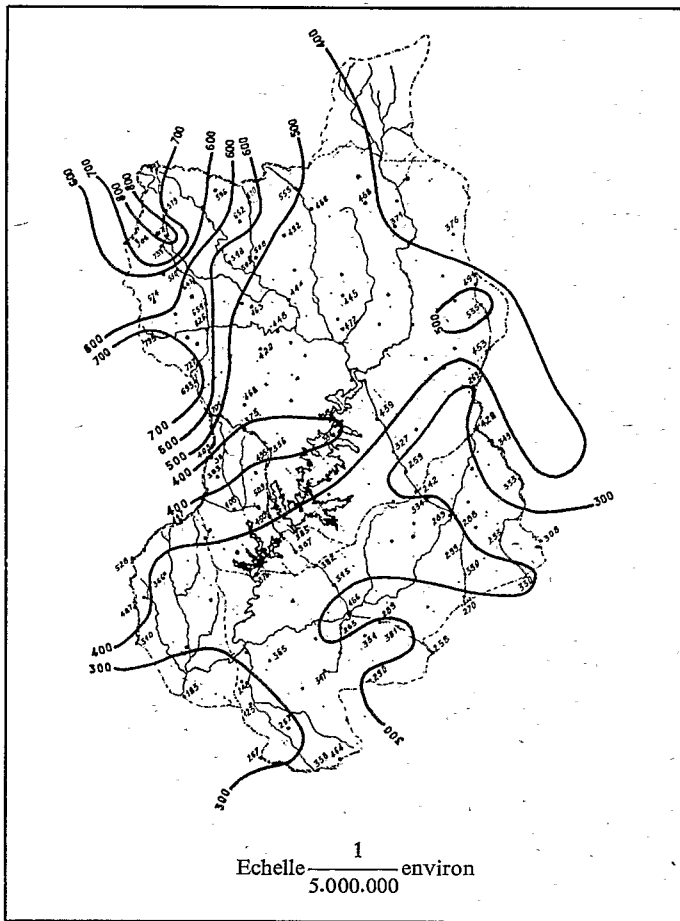
réseau des courbes isochrones. On constate alors que, pour la zone proche de l'exutoire, la configuration du réseau hydrographique et l'ampleur de la retenue de Bonete sont telles que les eaux, qui mettaient de 1 à 6 jours pour atteindre l'exutoire avant 1945, arrivent, depuis, en 24 heures dans le lac. Celui-ci ne présentant aucun étranglement pouvant provoquer une mise en vitesse, les volumes y arrivant entraînent immédiatement (tout au moins à l'échelle de la journée qui est celle de notre analyse), une hausse de niveau à Bonete. Avant la construction du barrage, on compte un temps de concentration de 18 jours pour le bassin, après la construction du barrage, ce temps n'est plus que de 12 jours; la quasi-totalité de la superficie proche de Bonete limitée par l'ancienne courbe «6 jours» l'est maintenant par la courbe «1 jour». L'importance relative de cette superficie est fortement accrue vis-à-vis de celle des autres zones.

Par voie de conséquence, s'expliquent ainsi la réduction des temps de montée et de ruissellement des crues dans le lac et l'augmentation du volume d'eau écoulé, donc du débit, le jour de l'apport maximal.

Cette reconstitution de la crue de septembre 1918 dans ses conditions réelles conduit à un hydrogramme synthétique qui se superpose assez bien avec celui observé. Il nous semble qu'après cette double démonstration, menée à bien grâce à la méthode de l'hydrogramme synthétique, l'influence sur les hydrogrammes de crue du réservoir de Bonete est nette. On peut admettre la dualité des familles de crues : avant 1945 et après la construction de Bonete.

PLUIE DU 3 OCTOBRE 1956

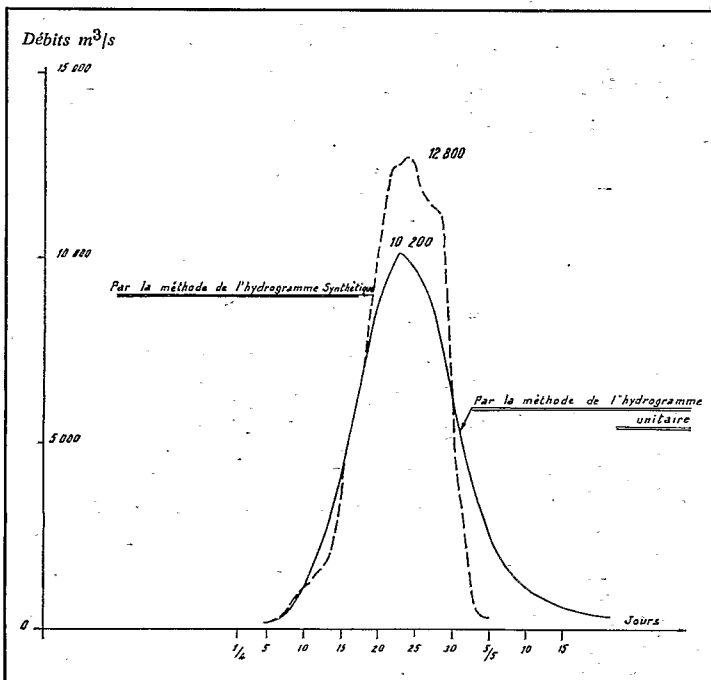




Reconstitution de la crue d'avril 1959

Le phénomène pluvieux responsable de cette crue est d'une toute autre importance que les épisodes pluvieux de 1918 et de 1956 que nous venons de voir. Ceux-ci peuvent être considérés comme de récurrence décennale, pour fixer les idées.

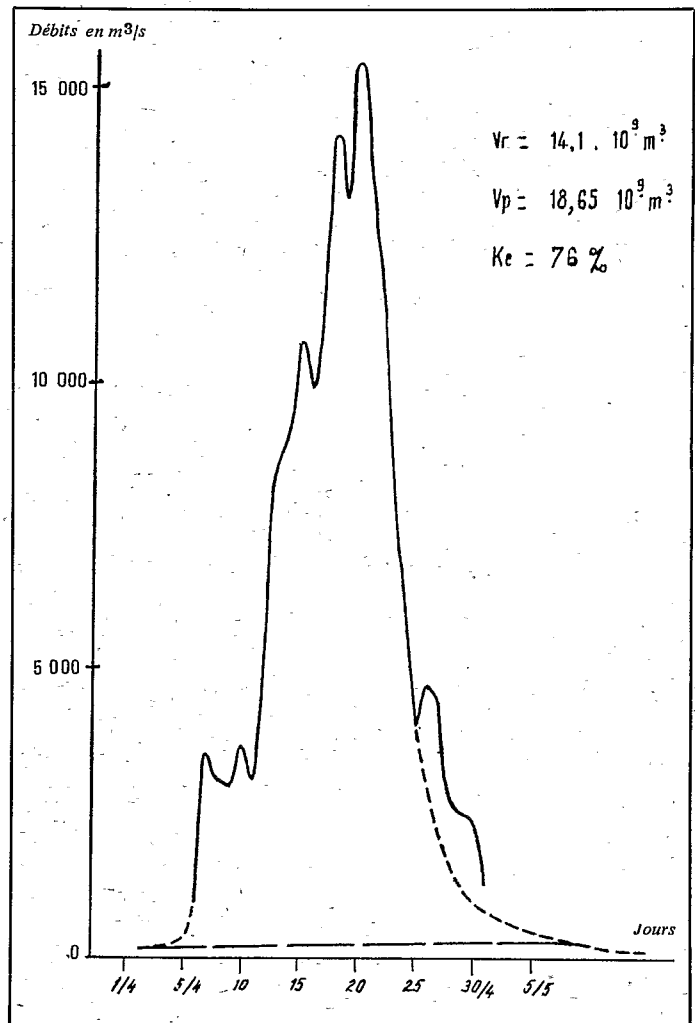
ESTIMATION DE LA CRUE D'AVRIL 1959 «Sans réservoir à Bonete»



Une approche de la fréquence du phénomène pluvieux d'avril 1959 a été tentée en appliquant la méthode des «intensités-durées-surfaces» qui convenait fort bien dans ce cas, application rendue possible grâce aux excellents relevés du Service Météorologique de l'Uruguay. On a pu de la sorte montrer qu'il s'agissait certainement d'un événement plus que centenaire sans pouvoir affirmer avec précision si sa fréquence était plus proche d'un centième que d'un millième (1).

En avril 1959, sur un terrain déjà saturé par quelques pluies préalables, survinrent, *sans accalmie*, deux phases pluvieuses du 6 au 12 et du 13 au 17, les précipitations

**CRUE D'AVRIL 1959
(Débits d'après plan U.T.E. 5950B)**

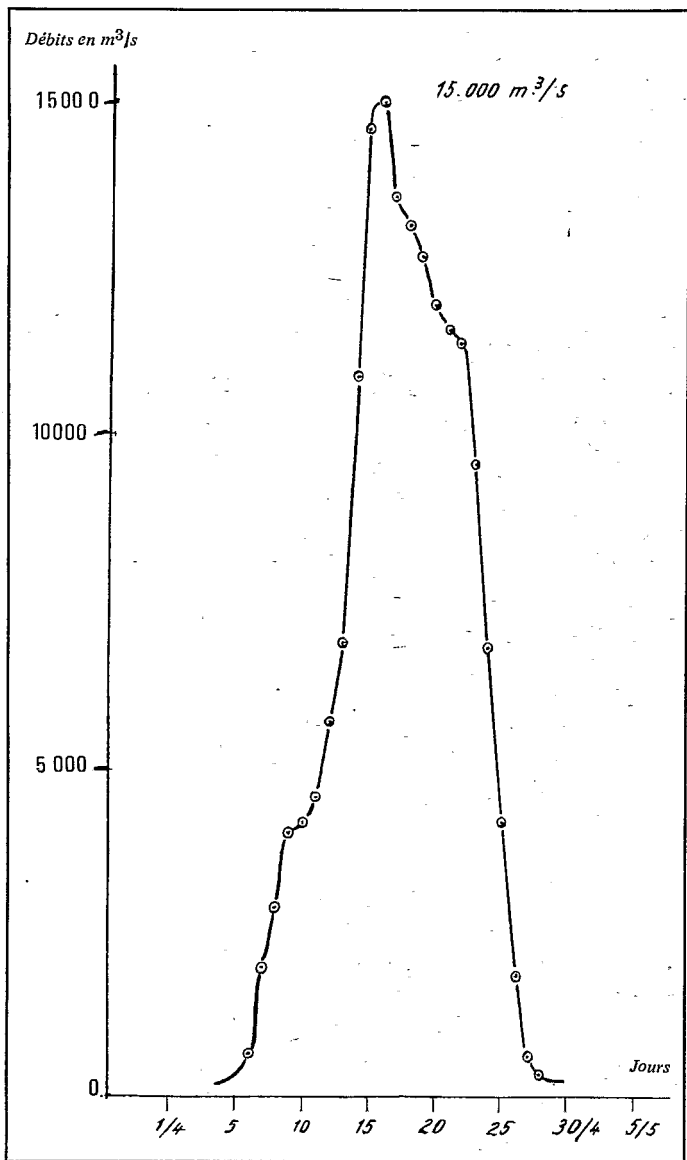


les plus intenses se produisant les 2 derniers jours durant lesquels elles atteignirent 100 mm sur plus de 20 000 km². Au total, du 6 au 16 avril, il était tombé 470 mm. Il y eut 76% d'écoulement.

Dans sa structure, le phénomène pluvieux d'avril 1959 ne se différencie pas des anciens paroxysmes connus. Cependant, la succession des phases pluvieuses y a été beaucoup *plus rapide* et les intensités des précipitations plus élevées. Le phénomène d'avril 1959 s'inscrit comme exceptionnel, surtout par son intensité.

(1) Nous avons fait une communication au Congrès de Berkeley de l'A.I.H.S. en 1963, intitulée «L'emploi du réseau pluviométrique de base pour étudier la variabilité des précipitations dans l'espace. L'exemple des chutes de pluie à grande extension sur les pays de la Plata».

CRUE D'AVRIL 1959
(Hydrogramme synthétique à partir des pluies)



Notre reconstitution de la crue d'avril 1959 s'effectue en utilisant la méthode de l'hydrogramme synthétique telle que nous l'avons employée pour les crues de 1956 et de 1918 :

- a) dans les conditions existantes aujourd'hui, c'est-à-dire avec retenue,
- b) dans les conditions régnant avant 1945, c'est-à-dire avant la construction du barrage.

La première reconstitution nous donne une crue très proche de celle calculée par les hydrauliciens uruguayens, et dont le débit maximal est de 15 000 m³/s.

La seconde reconstitution nous donne une crue plus molle, retardée et culminant seulement à 12 800 m³/s.

Une troisième reconstitution a été entreprise en partant de l'hydrogramme-type du Rio Negro établi à partir des crues observées avant 1945; elle nous donne une crue d'allure identique à la deuxième reconstitution, mais avec un maximum de 10 200 m³/s seulement.

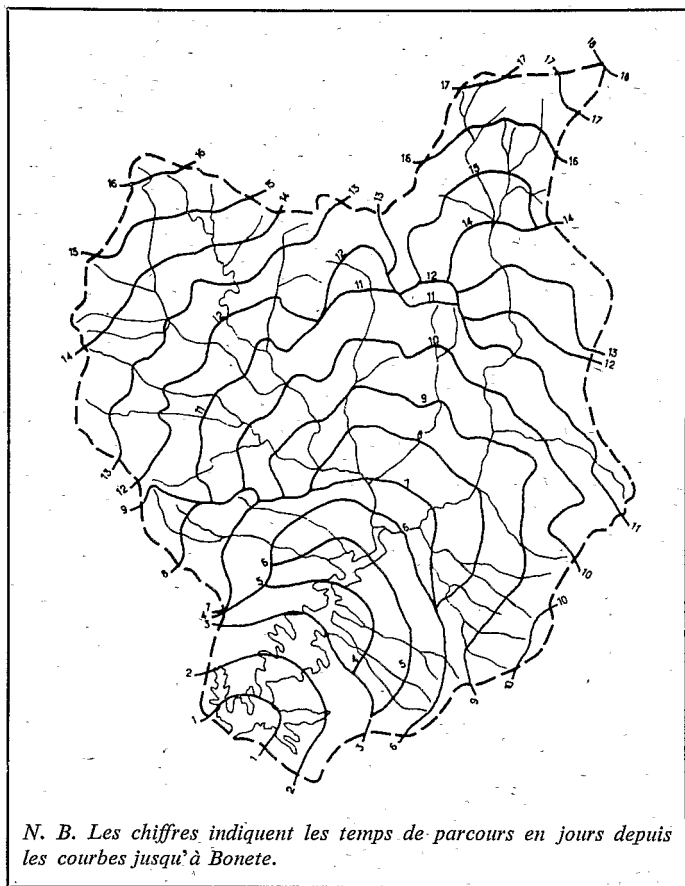
On retrouve, là aussi, les mêmes constatations quant à l'influence de la retenue de Bonete : accélération de la propagation de la crue, aggravation du débit maximal. Que l'on nous entende bien : il ne s'agit pas d'affirmer

que la présence d'un lac le long du Rio Negro y aggrave la pointe de crue; non, et, en effet, malgré les brèches et le débordement en crête, le barrage a joué en 1959 son rôle d'amortisseur classique puisque la crue *en aval* s'est trouvée réduite considérablement en volume et que son maximum est tombé d'environ 15 400 m³/s à une valeur située entre 8 800 et 10 800 m³/s suivant les interprétations. Mais ce que nous pensons, c'est *qu'en amont* de Bonete, la crue est aggravée par le lac et que le débit maximal par rapport aux conditions naturelles d'avant 1945 est accru de 25% environ. En effet, des deux débits trouvés, celui de 12 800 m³/s est certainement le plus près de la réalité, le second de 10 200 m³/s est manifestement trop faible et cela tient intrinsèquement à la méthode de l'hydrogramme-type, qui sert à recomposer la crue et qui n'est qu'une moyenne, laquelle estompe les irrégularités de tel ou tel hydrogramme réellement observé.

Par exemple, le maximum moyen retenu est de 3 800 m³/s pour un volume ruisselé de 5.109 m³, mais trois hydrogrammes sur 9 avaient des maximums situés entre 4 100 et 4 250 m³/s. Leur seule prise en considération aurait conduit à un débit proche de 12 000 m³/s pour la crue d'avril 1959, car un phénomène exceptionnel ne peut être bien reconstitué qu'en repartant d'impulsions élémentaires, elles aussi d'origine partiellement exceptionnelle.

En résumé, après l'édification du barrage, si les crues survenant dans le lac ont, pour des pluies comparables, un même volume total, le volume maximal journalier

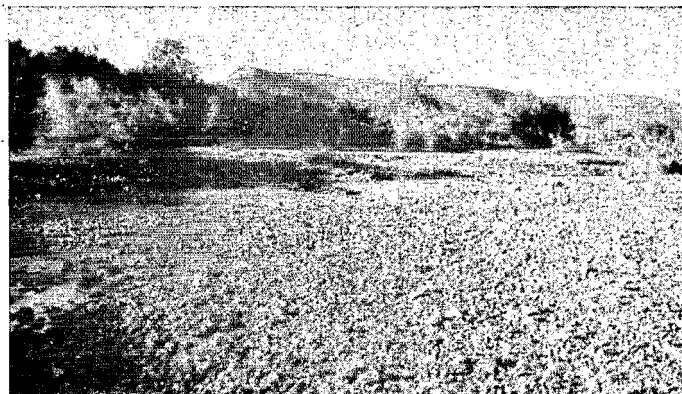
TRACE DES COURBES ISOCHRONES DANS L'HYPOTHÈSE D'UN BASSIN AVEC RESERVOIR A BONETE



N. B. Les chiffres indiquent les temps de parcours en jours depuis les courbes jusqu'à Bonete.

lier, donc le débit maximal, est accru de 20 à 25% et survient 5 à 7 jours plus tôt.

Avec cette dernière démarche, nous arrivons au bout de l'histoire des crues du Rio Negro. Une histoire qui devient plus compréhensible maintenant que nous distinguons mieux nos deux familles de crues et la distorsion à faire disparaître si nous voulons les homogénéiser et les comparer. Ainsi, la famille des 83 crues supérieures à $1\,500\text{ m}^3/\text{s}$, apparues de 1908 à 1944, ne peut guère nous fixer que sur la *fréquence décennale* qui doit logiquement s'appliquer aux premières valeurs circonscrites entre $5\,000$ et $5\,500\text{ m}^3/\text{s}$ (environ 130 l/s/km^2) à Bonete. Dans cette famille, la crue de 1888 avec $8\,000\text{ m}^3/\text{s}$ (200 l/s/km^2), soit 1,5 fois plus que la valeur décennale, prendrait place comme un événement de retour séculaire approximativement. Et notre crue d'avril 1959, avec $12\,800\text{ m}^3/\text{s}$, par exemple, ramenée aux conditions antérieures à la création de la retenue de Bonete (325 l/s/km^2),



Lit mineur en étiage dans le haut-bassin du Rio Negro

de la crue d'avril 1959 nous laisse penser que ce phénomène n'est pas un maximum. En d'autres termes, une même hauteur de précipitations en dix jours aurait pu

soit 1,5 fois plus que la crue de 1888, n'est plus démesurément incomparable, bien que sa fréquence semble rester *tout de même des plus faible et, de toutes façons, plus faible que la fréquence centenaire*. La disparité qui régnait entre cette crue et les phénomènes précédemment observés s'atténue et devient moins inimaginable. Si, à l'inverse, on garde les $15\,000$ à $17\,000\text{ m}^3/\text{s}$ calculés et qu'on leur compare la crue de 1888, élevée à $10\,000\text{ m}^3/\text{s}$, et les suivantes à près de $7\,000\text{ m}^3/\text{s}$, en admettant que la famille soit homogénéisée dans l'hypothèse de l'existence du barrage, on peut refaire la même constatation.

En prenant quelque recul afin de nous livrer à une comparaison géographique, nous rappellerons que la crue du Rio Negro à Bonete, ramenée aux conditions naturelles, soit 325 l/s/km^2 pour $40\,000\text{ km}^2$, est un phénomène qui s'apparente assez bien avec les grandes crues connues au sud du Brésil et dans l'est des Etats-Unis : Ohio en mars 1936, Rio Jacui en mai 1941. Elle reste inférieure à certains paroxysmes comme ceux du Potomac et de la Susquehanna en mars 1936 et celui de l'Iguazu brésilien en juin 1936.

20 L'examen des conditions pluviométriques responsables

provoquer une crue supérieure si sa répartition temporelle et spatiale avait été différente. En restant dans le domaine du concevable, nous avons ainsi établi divers schémas possibles de paroxysmes pluvieux à partir desquels nous avons déduit les hydrogrammes synthétiques des crues qu'ils pourraient engendrer.

La brèche ouverte dans la digue latérale du barrage de Bonete en avril 1959



Le Rio Negro en moyennes eaux à l'aval de Boneté ($60\,000\text{ km}^2$ de bassin)

Ce processus nous a amené, pour la crue maximale limite du Rio Negro à Bonete, à une valeur du débit maximal égale à 23 000 m³/s, soit 580 l/s/ km². Cela correspondrait à un débit spécifique en écoulement naturel, sans barrage, compris entre 470 et 500 l/s/ km² par exemple. Nous nous rapprochons, sans les dépasser, des maximums mondiaux déjà signalés sur des cours d'eau de régimes comparables.

En matière de conclusion, il est intéressant d'avoir pu mettre en évidence le rôle d'une grande retenue sur la formation des crues. Lors du calcul de la crue excep-

tionnelle d'une rivière pour laquelle est envisagé un aménagement hydroélectrique, et si celui-ci doit se matérialiser par la création d'une retenue assez grande pour modifier le temps de concentration du bassin alimentaire et la répartition temporelle des apports, l'hydrologue ne devrait plus se contenter d'une estimation dans les conditions naturelles régnantes, mais aurait le plus grand intérêt à étudier l'incidence de cette création de retenue sur le volume maximal d'apport journalier, incidence qui pourrait l'amener, dans certains cas, à accroître le dimensionnement de l'évacuateur de crues.

INFLUENCE OF LARGE-SCALE DAMMING ON FLOODS-EXAMPLE OF THE RIO NEGRO (URUGUAY)

Located between the 31 th and 34 th parallels, southern latitude, the drainage basin of the Rio Negro in Uruguay is subjected to a subtropical climate influenced by the proximity of the sea.

Although hot summer and cold winter seasons are clearly separated, and that apparently average monthly rainfall is 70 to 130 mm. i.e. 1000 to 1200 mm a year, the distribution of this precipitation is extremely irregular : rains of considerable duration and intensity, as well as long droughts, may occur at any time of the year.

The Rio Negro, draining a sloping basin laying from one part upon the cristalline bed of the earth from another upon sedimentary deposits (sand, clay and sandstone), and having a surface stratum made of thin and relatively impervious soils covered by grassy vegetation intensely used as grazing land, has a violent rate of flow during rainy periods, but spare reserves to supply itself with, during dry seasons. The total area of the basin is approximately 71,000 square kilometers, 40,000 square kilometers of which, in the upstream northwest part, supplying the large dam of Rincon del Bonete. The hydrological rate at this plant is quite well known through regular observations dating back from 1905 :

- winter high waters from June to October (average of 750 to 880 cu. m. per sec),*
- summer low waters in January and February (130 to 170 cu. m. per sec., average),*
- average module for the year : 525 cu. m. per sec., i.e. specific module 13 l/s. km² (percentage of accuracy 90% : 455 and 595 cu. m. per sec.),*
- high irregularity between different years ; decennial frequency modules equal to 1000 and 150 cu. m. per sec. and variation coefficient 0,59.*

Since 1945 the hydroelectric plant of Rincon del Bonete, of an approximately 110,000 kW power, has been using the upper stream waters of the Rio Negro, stored in a reservoir which total capacity runs about 14 billion cubic meters. In April, 1959, a series of sizeable precipitations on the upper-basin caused a feshet so extensive that the reservoir filled up and overflowed the top of the dam; the waste-weir, calculated to carry off 5500 cu. m. per sec. at the highest admissible rate, was not sufficient for draining the water. Moreover, water flowed out of the reservoir through two small passes. In order to prevent dam from breaking, since the plant downstream was already flooded over, a side dike was blown up.

Once the catastrophe was over, questions were raised as to its origins. The first task was to calculate roughly the rate of flow of this exceptional flood, using graphs of the filling up of the weir and the most probable estimates for the various overflows. According plausible hypotheses the hydraulic engineers found that total daily outflows had reached a maximum of 8800 to 10,800 cu. m. per sec. and that similarly the rate of flow into the reservoir reached a maximum of 15,400 to 18,000 cu. m. per sec. (average flow over 24 hours). On our own account, and after verification, we adopted the above lower limits as the most plausible.

For the Rio Negro, which drains, as we have said, 40,000 square kilometers of low plains and hills covered with grassy vegetation, a maximum flow of 15,000 cu. m. per sec. over a period of 24 hours represented an extraordinary quantity, apparently inexplicable.

Observations from 1908 to 1945 indeed showed eighty-three floods above 1500 cu. m. per sec., three of the highest of which were between 5000 and 5500 cu. m. per sec.

The Bonete project, planned before 1940, provided for millennial flood of 9000 cu. m. per sec. After the last world war, with the development of hydrological knowledge, American and Uruguayan specialists came to fear that this millennial flood had been underestimated, and decided for a figure approximating 12,000 cu. m. per sec.

Nonetheless, the freshet of April 1959, with its 15,400 cu. m. per sec was still of usual limits and nearly unaccountable except as a very rare cataclysm.

We must point out that the gap between the floods of 5500 cu. m. per sec. and that of 15,000 cu. m. per sec. is only an apparent one. As a matter of fact two floods are known of during the period preceding 1908 far exceeding 5500 cu. m. per sec., one of which, that of 1888, must have reached a maximum of nearly 8000 cu. m. per sec.

Moreover, since 1945, although the records of the Bonete reservoir levels are not systematically interpreted in terms of daily rates of flow, the few observations that we have made show up several floods exceeding 5500 cu. m. per sec.

So we already suspect that freshets of over 5500 cu. m. per sec. are perhaps not exceptionally rare, if but the one that took place in 1959, and they occur more frequently from 1945 onwards.

In 1961, under SOFRELEC, to which was confided by the U.T.E. (1), the study of a project for an hydroelectric plant for the lower portion of the Rio Negro stream, we had to fix up the maximum flood freshet to be allowed for on the Rio Negro at Bonete, and modifications to be made in the hydroelectric system depending upon our conclusions.

We began with a qualitative analysis of the main floods known since 1908 and rainfalls responsible for them. This analysis showed us the mechanism producing the high floods in Uruguay. The heavy rainfalls were the result of the passing of low thermal areas affecting Uruguay for from two to five days; these rainfalls are very wide in range, very often covering more than 100,000 square kilometers. At Bonete, before the construction of the weir, an elemental impulse of this order produced a flood reaching its crest ten to fifteen days later, the draining of which could last 40 days.

Such rainy periods generally come separately from one another; but a series of four to five of them may be observed during a period of three weeks approximately, causing a series of swellings which reinforce one another and lead to a vast, complex and polygenetic flood.

Such were the causes of the floods of over 5000 cu. m. per sec. between 1908 and 1945 and that, a priori, of the highpoint of April 1959.

At this point in our investigations, it was obvious that a direct statistical study of the floods would be useless

and that only by approximating the phenomenon by means of the precipitation, we could come to understand the flood of April 1959, and perhaps get a clear idea of the frequency. Moreover, it seemed that the Bonete reservoir had an aggravating effect upon the maximum flood flow-rates which we had to bring up-to-date.

The spatial uniformity of the precipitation and drainage basin enabled us to use the method of the synthetic hydrogram for reconstructing these floods, using proceeding developed in France by Mr. LABRIEU.

We adopted the following research plan to carry our work out :

- 1) Reconstitution of a heavy flood which occurred since 1945, from precipitations and using the method of synthetic hydrography.
- 2) Application of this method, thus perfected, to a series of rains comparable to the former one, but which occurred before 1945.
- 3) Reconstruction of the flood of April 1959 under the conditions it took place, and hypothesizing the event's taking place before the building of the dam.

We shall go somewhat into detail concerning these three phases of our study.

Reconstruction of the flood of October 1956

This was a flood of 7000 cu. m. per sec. caused by the successive passing of three rainy periods of 3,3 and 5 days, with 5 to 9 day intervals between them. All in all, 388 mm of rain fell in 23 days, from which 66 % ran off.

We made several tests in order to make the best possible relationship among the variables of the synthetic hydrogram method :

- the run-off coefficients and their daily variation as a function of the saturation of the land and the volume of the rains,
- the coefficients of the modulation of the shape of the elemental hydrograms coming from the different isochronic zones.

On the following graphics are shown, on one hand, the isochrone curves, on the other hand, the flood of Octobre 1956, and its reconstructed hydrogram which are quite comparable.

Reconstruction of the flood of September 1918

The rainy origins are of the same type as those of the 1956 flood : three rainstorms of 4,4 and 2 days, with intervening calms of 5 and 4 days.

There was a rainfall of 342 mm. in 19 days with a distribution over the bassin very similar to that of the 1956 rains. 79% of the water ran off, and the maximum rate of flow was 5840 cu. m. per sec.

(1) National Electrical Plant and Telephone Company of the State of Uruguay.

To this phenomenon we applied the synthetic hydrogram system with the same values for the variables as those calculated for the 1956 flood. The conditions were thus those of the Rio Negro with weir at Bonete. The conclusions are clear-cut. With respect to the real hydrogram observed in 1918, the calculated synthetic hydrogram has the following modifications :

- a) run-off period reduced from 45 days to 32 days,
- b) date of highest flow moved seven days ahead,
- c) increased peak flow going from 5480 to 8000 cu. m. per sec. If this latter flow cannot be considered differently as an approximation accurate to 15%, nevertheless the peak flow seems increasing from 20 to 25% by the Bonete dam's presence.

It was wise to check these conclusions before finally adopting them. In order to do this, it seemed judicious to us to calculate flood from the precipitation, but under the natural conditions of 1918, that is, without the Bonete weir.

The essential modification required by this situation was in the drawing of the isochronic curves. It is then observed that for the zone near the outlet, configuration of the hydrographic network and width of the reservoir at Bonete are such that water, which took one to six days to reach the outlet before 1945, arrives within the lake within 24 hours since. As the latter does not have any narrow channel which could bring about a rise in speed, the volumes arriving there immediately bring about (at least within the range of the day used in our analysis) a rise in water level at Bonete. Before the construction of the weir, the concentration period is counted to be 18 days for the basin, and after the building of the weir, this time is only 12 days; almost the total area near Bonete bounded by the former "6 day's" curve is now bounded by the "1 day" curve. The relative size of this area is greatly increased with respect to that of the other zones.

Consequently, this is the explanation of the reduced rising time and run-off time of the floods in the lake, and the increased volume of water running off, hence of the rate of flow, on the day of the maximum entry of water.

This reconstruction of the flood of September 1918, under its actual conditions, leads to a synthetic hydrogram quite similar in form to the one actually observed. It seems that after this double demonstration, carried out by means of the synthetic hydrogram method, the influence of the Bonete reservoir on the flood hydrograms is clear. We may adopt the idea of two separate families of floods : before 1945 and after the construction of Bonete.

Reconstruction of the flood of April 1959

The phenomenon of rainfall responsible for this flood is of a different order of size from the rains of 1918 and 1956 which we have just analysed. The latter may be considered as decennial recurrences, in order to make our ideas clear.

An approximation of the frequency of the rains of April, 1959, was attempted by applying the "intensity-duration-area" method, which is highly applicable in this case, and the use of which was made possible by the excellent recorded observations of the Meteorology Department of Uruguay. It was thus possible to show that we were dealing with a more than centennial occurrence, without being able to affirm precisely whether its frequency was nearer to one hundredth or one thousandth. ⁽¹⁾

In April, 1959, there occurred, on an already saturated soil and without any intervening calm, two rains from the 6th to the 12th and from 13th to the 17th, the heaviest falls coming the last two days during which they reached 100 mm over more than 20,000 square kilometres. Altogether, from April 6th to 16th, 470 mm of rain fell; 76% of it ran off.

In structure, the rains of April 1959 do not differ from the older known downpours. However the succession of rainy phases was much more rapid, and the intensity of the precipitation higher. The phenomenon of April, 1959, is considered exceptional, particularly in intensity.

Our reconstruction of the flood of April, 1959, was made by using the synthetic hydrogram method as used for the 1956 and 1918 floods :

- a) under the conditions existing today, i.e. with weir,
- b) under the conditions of before 1945, i.e. before the building of the dam.

The first reconstruction gives a flood very close to the one calculated by the Uruguay water experts, and has a maximum flow rate of 15,000 cu. m. per sec.

The second reconstruction gives us a milder flood, slowed down and reaching a climax of only 12,800 cu. m. per sec.

A third reconstruction was undertaken, starting from a prototype hydrogram for the Rio Negro, established from floods observed before 1945; this one gave us a flood identical in development to the second reconstruction, but with a maximum of only 10,200 cu. m. per sec.

Here also the same observations are made with respect to the influence of the Bonete reservoir : accelerated spreading of the flood, increased maximum flow. Let us make ourselves clear : we are not stating that the existence of a lake along the Rio Negro raises the peak of the flood; this is not the case and, in fact, in spite of breaks and in spite of the overflow of the damtop, the latter fulfilling well in 1959, its role of classical shock absorber since the downstream flood was considerably reduced in volume, and that the maximum fell from approximately 15,400 cu. m. per sec. to something between 8800 and 10,800 cu. m. per sec. depending upon the interpretation. But what we think is that the flood is worsened upstream from Bonete by the lake and that the maximum flow, with respect to the natural conditions before 1945, has increased by approximately 25%. In fact, of the two flow rates found, that of 12,800 cu. m. per sec. is

⁽¹⁾ We made a report to the Berkeley convention of the A.I.H.S. in 1963, entitled "Use of the basic pluviometric network in the study of the variability of precipitation in space. Example of the rainfalls of great extent over the countries of the Plata".

certainly closer to reality, the second one of 10,200 cu. m. per sec. being obviously too low, this resulting intrinsically from the prototype-hydrogram method, which serves to reconstruct the flood and which is nothing but an average toning down the irregularities of a given actually observed hydrogram.

For example, the average maximum used is 3800 cu. m. per sec. for a run-off volume of 5109 cu. m., but three hydrograms out of nine had maxima situated between 4100 and 4250 cu. m. per sec. The mere taking of them into consideration would have given a flow rate near to 12,000 cu. m. per sec. for the April 1959 flood, for an exceptional phenomenon can only be reconstructed well from elementary impulses, these also of somewhat exceptional origin.

To sum up, if, after the building of the dam, floods occurring into the lake have the same total volume, the maximum daily volume, for comparable rainfalls, then the maximum rate of flow is increased by 20 to 25% and comes from five to seven days sooner.

With this last step we arrive to the end of the Rio Negro floods story, a story which becomes more comprehensible now that we distinguish better between our 2 families of floods and the distortion to be mitigated if we wish to make them uniform and compare them. Hence, the family of 83 floods of over 1500 cu. m. per sec. occurring between 1908 and 1944 can hardly give us definite information on the decennial frequency which is logically to be applied to the first amounts included between 5000 and 5500 cu. m. per sec. (approximately 130 l/s. km² at Bonete). In this family, the flood of 1888 with its 8000 cu. m. per sec. (200 l/s. km²), or 1.5 times the decennial value, would be classified as a phenomenon occurring approximately every hundred years. And our flood of April, 1959, with 12,800 cu. m. per sec., for example, considered as occurring under the previous conditions to the creation of the Bonete dam (325 l/s. km²), or 1.5 more than the 1888 flood, is no longer exorbitantly incomparable, although its frequency seems nevertheless to be still among the lowest, and at any rate lower than centennial frequency. The disparity existing between this flood and the previously observed phenomena is diminished and becomes less incredible. If, inversely, the calculated 15,000 to 17,000 cu. m. per sec. are kept, and the flood of 1888

is compared to them, the latter reaching 10,000 cu. m. per sec., as well as the subsequent ones of about 7000 cu. m. per sec., supposing that the family is made uniform under the hypothesis of the existence of the dam, the same observation can be made.

Stepping back for a moment in order to make a geographical comparison, we recall to mind that the Rio Negro floods at Bonete, put back into natural conditions, i.e. 325 l/s. km² for 40,000 km², are a phenomenon quite closely resembling the great floods known in Southern Brazil and in the East of the United States: Ohio in March, 1936, Rio Jacui in May, 1941. It remains inferior to certain highs such as those of the Potomac and Susquehanna in March, 1936 and that of the Brazilian Iguazu in June, 1936.

The examination of pluviometric conditions responsible for the flood of April, 1959, makes us believe that its phenomenon is not a maximum. In other words, the same height of precipitation in ten days could have caused a flood still more severe if its temporal and spatial distribution had been different. Staying within conceivable domain we thus drew up various possible diagrams of rainy flood highpoints, from which we have deduced the synthetic hydrograms they could generate.

This process brought us to a maximum flow rate limit of 23,000 cu. m. per sec., or 580 l/s. km² for the Rio Negro at Bonete. This would correspond to a specific flow rate, under normal run-off conditions, without dam, of between 470 and 500 l/s. km² for example. We approach, without passing them, the world maxima already recorded on water streams with a similar rate.

In conclusion, it is interesting to have been able to make clear the part played by a large weir in the formation of floods. When calculating the exceptional flood figures for a river on which an hydroelectric plant is planned, and if this plant is to be made by the creation of a reservoir large enough to alter the concentration time in the tributary basin and the temporal distribution of the water coming in, the hydraulic engineer should be no more satisfied with an estimate made under the existing natural conditions, but would have greatest interest to study out the effect of this creation of a reservoir on the maximum daily volume brought in, effect which in some cases may lead him to increase the dimensions of the flood-gate.

RESUMEN

La influencia de una gran remansa sobre la formación de las aguas. Ejemplo del Río Negro. (Uruguay)

La cuenca del Río Negro, en el Uruguay, está bajo un clima de carácter subtropical de influencia marítima. El promedio anual de precipitaciones es de 1000 a 1200 mm. Pero el régimen es muy irregular: lluvias intensas y duraderas, así como largas sequías, pueden presentarse en cualquier período del año.

El Río Negro drena una cuenca vertiente de 71.000 km². Tiene un régimen violento en período de lluvias, pero dispone sólo de escasas reservas para alimentar su caudal básico en períodos secos. La parte noroeste río arriba de la cuenca (40.000 km²) alimenta la gran presa de Rincón del Bonete (capacidad de 14.000 millones de m³).

En abril de 1959 una crecida muy importante no pudo ser evacuada por el vertedero de la obra, calculado para 5.5000 m³/segundo; y el agua pasó por encima de la cresta de la presa.

El artículo analiza las causas de este accidente : dos fuertes fases pluviosas que se produjeron una tras otra sobre un terreno ya saturado. Del 6 al 16 de abril habían caído 470 mm, con 76% de infiltración. La crecida alcanzó un máximo de 15.400 m³/segundo, mientras que la crecida milenaria se preveía para 9 a 12.000 m³ por segundo.

El autor ha emprendido un análisis cuantitativo de las principales crecidas de que se tiene conocimiento desde 1908 y de las precipitaciones que son responsables. Ha reconstituido por el método del hidrograma sintético las crecidas más importantes (septiembre 1918 : 5480 m³/segundo ; octubre de 1956 : 7.000 m³ por segundo, abril de 1959). Este estudio le ha permitido enunciar que, para las dos últimas crecidas, la presencia de la presa de Bonete ha tenido una influencia indiscutible sobre la aceleración de la propagación de la crecida y sobre la agravación del caudal máximo.

Un remanso importante sobre un gran curso acuático puede, pues, modificar el tiempo de concentración de una cuenca de alimentación y la repartición temporal de los aportes. El hidrólogo debiera, pues, cuando hace el estudio de uno gran presano contentarse ya con la estimación de los datos en las condiciones naturales reinantes, pero encontraría el mayor interés en estudiar la incidencia de esta creación de remanso sobre el volumen máximo de aporte diario, lo que podría, en ciertos casos, llevar a aumentar el dimensionamiento de las crecidas.