

INSTITUTO DE APROVECHAMIENTO
DE AGUAS Y FOMENTO ELECTRICO
BOGOTA — COLOMBIA

CENTRAL HIDROELECTRICA DEL RIO PRADO

ETUDES HYDROLOGIQUES

Juillet 1965

Société Générale
d'Exploitations Industrielles
SOGEI - PARIS

AMENAGEMENT HYDROELECTRIQUE DU RIO PRADO - TOLIMA, COLOMBIE -
DETERMINATION DE LA CRUE MAXIMALE

SUR DOCUMENTS

PAR

P. CHAPERON et P. DUBREUIL

=====

O.R.S.T.O.M.
Service Hydrologique
PARIS - JUIN 1965

A 130 km au Sud-Est de BOGOTA, le RIO PRADO draine le versant de la cordillère orientale avant de se jeter en rive droite dans le RIO MAGDALENA en amont de la ville de PURIFICACION. Un aménagement hydroélectrique est en construction sur son cours inférieur où, à la faveur d'un rétrécissement (boquerón) doit s'édifier une digue en terre derrière laquelle pourra s'accumuler plus d'un milliard de m³ d'eau.

La présence de cette digue en terre et le fait que l'évacuateur de crues projeté devra emprunter une galerie souterraine d'un diamètre et donc d'un débit forcément limités, rendent nécessaires la détermination aussi exacte que possible de la crue maximale susceptible de se produire à l'issue d'un bassin andin de 1.450 km².

La durée des observations hydrologiques étant faible sur le bassin du RIO PRADO, on ne pourra procéder par analyse statistique des crues observées. Il faudra suivre le plan suivant :

a) analyse des principales crues en liaison avec les précipitations pour déterminer le mécanisme de transformation pluies - débits propre au bassin du PRADO.

b) inventaire statistique des précipitations observées sous des régimes pluvieux comparables à celui du RIO PRADO, pour mettre en évidence la séquence pluvieuse enveloppe de fréquence rare.

c) calculer les caractéristiques de la crue maximale par application du mécanisme de transfert des pluies en débits sur cette séquence pluvieuse maximale.

Cette étude est effectuée entièrement sur documents fournis par la SOGEL et en provenance de l'Instituto de Aprovechamiento de Aguas y Fomento Electrico, responsable de l'aménagement projeté et des observations hydro-pluviométriques en COLOMBIE.

Notre modeste expérience des régions andines et surtout les entretiens avec le Dr. FORERO, spécialiste colombien des problèmes hydrologiques à l'Instituto, ont permis de choisir les postes pluviométriques susceptibles de fournir des données de longue durée et situés dans des conditions climatiques comparables à celles du bassin du RIO PRADO.

La crue maximale à déterminer doit être d'une récurrence très rare. Ne connaissant pas le bassin du PRADO, nous avons peut-être été amenés à prendre certaines précautions dans cette détermination, mais en aucun cas, les coefficients de sécurité adoptés ne sont excessifs et nous pensons réellement que le résultat obtenu n'est pas exagéré et ne constitue pas un phénomène inconcevable pour le bassin du PRADO.

CHAPITRE 1 - DOCUMENTS UTILISES

Nous en donnons une rapide énumération.

11 - Relevés pluviométriques journaliers

On trouvera sur le tableau n° 1 le numéro de référence, l'altitude et le bassin hydrographique des principaux postes pluviométriques avec mention du nombre d'années d'observations pour les 7 stations du bassin du PRADO, les 4 stations voisines et les 10 stations anciennes de régime comparable.

On a utilisé en outre, les relevés s'étendant de 3 à 7 ans de douze poste pluviométriques situés dans des conditions climatiques comparables, puis dans les annuaires climatologiques de la Fédération Nationale des CAFETEROS.

12 - Données hydrologiques sur le RIO PRADO

- Relevés d'échelle à Puente CASABIANCA de mai 1956 à avril 1962, 3 fois par jour à 6, 12 et 18 h.
- Relevés d'échelles à TOMOGO de décembre 1959 à avril 1962, 3 fois par jour.
- Relevés d'échelles à TERMALES de décembre 1959 à avril 1962, 3 fois par jour.

La première échelle est celle de la station hydrométrique située un peu en aval du boqueron, à l'issue de 1.475 km² ; les 2 autres échelles encadrent le site d'aménagement ; des correspondances d'échelle entre elles et Puente CASABIANCA permettent de tracer les courbes hauteurs - débits dans le bief d'aménagement (SOGEI I note du 15/3/62 et plan 84-06-339).

On possède en outre :

- La liste des jaugeages effectués à Puente CASABIANCA (33 mesures entre 2,22 m et 3,94 m) à partir de laquelle est tracée la courbe d'étalonnage qui a été extrapolée jusqu'à 8,10 m (maximum atteint en décembre 1960) à l'aide des courbes de vitesse et de section mouillées.
- Les originaux de calculs de 4 jaugeages.
- Une note SOGEI pour estimer les débits de débordement sur la route aux abords du Puente CASABIANCA quand la cote dépasse 5,86 m (plan SOGEI 84-06-22 et plan topographique des abords du pont plan SOGEI 84-06-23).

/...

- Le tableau des débits journaliers correspondant à la moyenne des lectures d'échelle à Puente CASABIANCA de janvier 1962 à février 1965.

Sur une carte simplifiée au 1/250.000 (plan 1.020 de l'Instituto) on peut voir la position des postes pluviométriques et hydrométriques du bassin du RIO PRADO, la structure du réseau hydrographique et les limites du bassin versant.

ETAT DES PRINCIPALES STATIONS PLUVIOMETRIQUES UTILISEES

Nom de la station	Numéro de classification	Bassin hydrographique	Altitude en mètres	Période observée disponible
ACO	4 - 1062	PRADO	360	4 ans
BOQUERON	4 - 1064	"	(400)	3 ans
CUNDAY	4 - 1021	"	450	7 ans
LOZANIA	4 - 1061	"	380	5 ans
PINALITO	4 - 1063	"	800	6 ans
PRADO	4 - 1032	"	400	7 ans
VILLARICA	4 - 1022	"	1.130	4 ans
DOLORES	4 - 1034	MAGDALENA	1.470	3 ans
PURIFICACION	4 - 1033	"	403	4 ans
PANDI	4 - 1001	SUMADAZ	675	6 ans
CABRERA	4 - 1003	"	1.900	4 ans
BOGOTA (cité universitaire)		BOGOTA	(2.600)	1941 - 62
AMBALEMA - PAJONALES		MAGDALENA	(300)	1940 - 60
LA MANUELITA	6 - 8001	CAUCA	1.000	1940 - 60
CHINCHINA		"	1.380	1942 - 58
RIO FRIO	6 - 1014	"	1.000	1946 - 59
MUNCHIQUE	12 - 1001	"	2.500	1947 - 62
CONCHA	5 - 6025	"		1942 - 47
MAZO	5 - 6037		2.555	1948 - 60
MIGUEL de AGOINAGA	5 - 6038 R		1.550	1961 - 62
CALI - Planta del Rio		CALI	1.080	1952 - 60

CHAPITRE 2 - ANALYSE DES CRUES OBSERVEES SUR LE RIO PRADO

21 - La courbe d'étalonnages à Puente Casabianca

Les jaugeages exécutés par les hydrologues colombiens ont été calculés par la méthode arithmétique en estimant la vitesse moyenne U à chaque verticale à l'aide de la relation suivante :

$$U = \frac{1}{2} (V_{0,2} + V_{0,8}) = V_{0,6}$$

Les vitesses ont été mesurées au moulinet : soit une mesure à 6/10 de la profondeur ($V_{0,6}$) soit deux mesures aux 2/10 et aux 8/10 ($V_{0,2}$ et $V_{0,8}$) lorsque les profondeurs sont plus fortes.

Un contrôle par tracé des isotaches a été exécuté pour les jaugeages 20 - 25 - 30 et 33 dont nous avons eu copie.

Les résultats obtenus sont les suivants :

Hm	Q_1 m ³ /s (methode arith- métique)	Q_2 m ³ /s (isotaches)	Q/Q_2
3,18	68,3	65,7	4 %
2,62	23,7	23,8	0
2,46	14,85	14,1	5 %
2,38	11,27	10,4	8 %

La faible densité des points de mesures rend difficile un tracé précis des isotaches. En raison de cette imprécision, l'excès des débits obtenus par la méthode arithmétique a été considéré comme non significatif.

L'extrapolation de la courbe $Q(H)$ par la formule $Q = a(H - H_0)^n$ donne des résultats supérieurs à l'extrapolation des hydrologues ; faute d'éléments suffisants pour la corriger, nous conserverons celle-ci telle quelle.

Les débits pour $H = 5,86$ m ont été corrigés en tenant compte des estimations de la SOGEL pour les débits passant au dessus de la route.

Cette courbe d'étalonnage donne les débits de basses et moyennes eaux avec une bonne précision, de l'ordre de ± 5 %.

Pour les crues inférieures à 6 m, on peut estimer que l'extrapolation en permet l'appréciation à + 10 % près; la crue maximale de 8,10 m ne peut avoir son débit connu qu'à + 15 % ce qui est encore à peu près suffisant pour l'analyse que nous entreprenons.

22 - Inventaire des crues observées

Bassin de montagne de faible superficie, le RIO PRADO réagit très rapidement aux précipitations et peut donner lieu à plusieurs crues indépendantes séparées par des périodes de basses eaux (10 à 30 m³/s) au cours d'une même année.

On a admis comme limite d'apparition d'une crue la cote de 5,00 mètres à l'échelle, soit environ 290 m³/s ou 200 l/s km².

Le tableau n° 2 récapitule l'inventaire des 24 crues ainsi sélectionnées sur 9 ans de relevés (1956 à 1964). Son examen appelle quelques remarques :

- a) 3 années sur 9 aucune crue n'a atteint 5,00 m (en fait, 4,35 et 4,75 m soit 200 et 250 m³/s seulement).
- b) si l'on classe ces 24 crues, les 9 plus fortes forment 2 ensembles distincts, celui des crues de récurrence 1 à 3 ans environ entre 6,00 et 6,93 m (9° et 2° rangs) et celui de la crue de 8,10 m de décembre 1960 de récurrence plus rare.

Pour la gestion d'un aménagement hydro-électrique, il est intéressant de connaître les risques d'apparition des crues au cours de l'année. Bien que réduit, l'échantillon de 24 crues donne un aperçu de ces éventualités :

15 crues soit 62 % se produisent d'octobre à décembre.

6 crues soit 25 % surviennent en avril et mai.
le reste se répartit entre janvier, février et mars.

CRUES SUPERIEURES A 5,00 m à PUENTE CASABIANCA

Année	Date	Cote m	Remarque
1956			Néant
1957			Néant
1958	4 décembre	5,00	pointe double
1959	5 mai	5,00	complexe
	13 novembre	5,70	
	15 novembre	6,40	
	20 novembre	6,42	
	13 décembre	5,30	pointe double
1960	1 janvier	5,70	pointe double
	24 octobre	6,00	
	30 octobre	5,50	
	7 novembre	6,85	
	2 décembre	8,10	pointe triple
	10 décembre	5,65	
1961	5 avril	5,95	
	22 avril	5,86	
	16 novembre	5,10	pointe double
1962	8 mars	5,60	
	28 mai	6,20	
	13 octobre	6,20	
	17 novembre	5,75	
1963	2 février	5,95	
	12 avril	5,31	
	3 mai	6,93	
	28 octobre	5,75	
	15 novembre	6,80	
1964			Néant

23 - Analyse des principales crues en liaison avec les pluies

Pour les principaux événements pluies crues, les caractéristiques suivantes ont été déterminées :

- Pm Pluie moyenne sur la bassin versant, calculée à partir des isohyètes.
- K Coefficient d'abattement de pluie, rapport de la hauteur moyenne Pm à la hauteur ponctuelle maximale observée Pmax.
- Vr Volume ruisselé au cours de la crue déterminée après tracé de l'hydrogramme et séparation de l'écoulement de base.
- Kr % Coefficient de ruissellement global : rapport du Volume ruisselé au volume global de la pluie.
- tm temps de montée décompté entre le début de la crue et son maximum.
- T_B Temps de base ou durée de la crue.
- Q_{max} Débit maximal de crue.
- Q₀ Débit de base, initial.

Pour les crues postérieures à avril 1962, les relevés en notre possession ne donnent que les débits correspondants à la hauteur moyenne journalière. Le tracé des hydrogrammes en est beaucoup moins précis et ne permet pas le plus souvent de séparer les crues préliminaires (ni même de les déceler) de la crue principale. Les temps de montée et de base ne peuvent alors être estimés.

Seules les crues antérieures à avril 1962 sont donc bien connues pour une analyse fine de la forme de l'hydrogramme.

On trouve sur le tableau n° 3 les caractéristiques ainsi définies pour les 15 crues retenues.

/...

CARACTERISTIQUES DES PRINCIPALES CRUES DU RIO PRADO

Date	P.moy en mm	K	Vr 10 ⁶ m ³	Kr %	tm heures	T _B heures	Q _{max} m ³ /s	Q _o m ³ /s	Observations
12-13/11/59	36	0,36	25,75	48,5	18	66	420	70	Unitaire
14-15/11/59	≈ 60	0,66	32,4	37	18	80	510	100	Unitaire
19-20/11/59	30	0,60	34,1	77	18	66	508	75	"
24-25/10/60	(20)	0,35	23	(78)	15	42	440	80	" aval
/11/60	(15)	0,44	27,8	(> 100)	10	64	584	70	"
1-3/12/60	80	0,56	96,7	82	30-35	> 100	840	60	crue double
5/4/61	45	0,55	41,2	63	22	75	433	75	"
8/3/62	(50)	0,56	22,75	32	16	58	380	60	Unitaire
28/5/62	≈ 40	0,44	36,4	61			472	70	crue prélimi- naire.
12/10/62	≈ 60	0,44	37,4	43			472		crue composée
16-17/11/62	≈ 30	0,39	29,7	68			402	70	crue prélimi- naire.
1/2/63	≈ 60	0,55	30,9	34,5			433	50	crue unitaire
1 ou 4/5/63	≈ 60	0,36	74	85			583		crue composée
28/10/63	≈ 60	0,48	23,6	27			402	50	crue unitaire
14-15/11/63	≈ 30	0,33	39,9	92			564	150	crue composée

L'examen du tableau appelle plusieurs remarques :

- a) on ne connaît des précipitations que leur total en 24 heures, ce qui est insuffisant pour bien préciser le temps de réponse du bassin aux précipitations ; il faudrait des enregistrements continus des chutes de pluie. On admettra que le temps de réponse est du même ordre de grandeur que le temps de montée.
- b) la densité des pluviomètres sur le bassin est insuffisante pour permettre un bon tracé des isohyètes et par conséquent une bonne appréciation de la hauteur des pluies et surtout de leur irrégularité spatiale en liaison avec le relief, l'altitude et l'exposition aux vents dominants.
- c) les précipitations se divisent en deux groupes assez distincts, l'un comprend les pluies intéressant l'ensemble du bassin et qui ont généralement leur épïcêtre sur une ligne CONDAY-LOZANIA-ACO, l'autre comprend des pluies localisées sur l'aval du bassin dans le triangle ACO-PINALITO-PRADO.

Il est logique que par rapport à l'épïcêtre observé précipitation, le second groupe donne lieu à un abattement pour la pluie moyenne bien plus sévère que le 1^o groupe : 30 à 45 % contre 50 à 65 %. Les précipitations centrées sur l'aval du bassin ont généralement des hauteurs supérieures à celles qui intéressent les parties centrale et amont.

- d) le ruissellement est très important, fortes pentes, roches imperméables, faible couverture végétale lui sont éminemment favorables. A l'issue de longues périodes pluvieuses, le coefficient de ruissellement K_r atteint couramment des valeurs de 75 à 90 %. Le fait d'avoir une valeur supérieure à 100 % en novembre 1960 confirme simplement la faible densité du réseau pluviométrique à travers les mailles duquel peut passer inaperçu un violent orage très localisé, puisque la crue a été observée en concordance aux 3 postes limnimétriques sans contestation possible.

24 - Choix d'un hydrogramme type du bassin

A la dualité de forme et de structure des précipitations correspondent deux réactions différentes du bassin qui se manifestent par des hydrogrammes de forme distincte. En se limitant aux précipitations de courte durée ayant engendré une crue unique, on peut faire apparaître clairement ces distinctions en homogénéisant tous les hydrogrammes de ruissellement observés comme s'ils correspondaient à un volume ruisselé de 25 millions de m³.

On obtient ainsi à la suite de précipitations intéressant l'ensemble du bassin, 6 crues types dont les hydrogrammes de ruissellement ramenés à $25 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ sont présentés dans le tableau n° 4.

Leurs caractéristiques sont :

- temps de montée voisin de 18 heures
- temps de base de 60 à 70 heures.
- débit maximal variant de 310 à 370 m^3/s .

Un choix raisonnable à partir de ces données permet de proposer une distribution médiane de l'hydrogramme type, qui figure aussi sur le tableau n° 4.

Les précipitations d'octobre et novembre 1960 centrées sur l'aval du bassin ont donné lieu à des crues plus aiguës et plus rapides. La réduction du temps de concentration et de la durée de ruissellement va de pair pour un hydrogramme ramené à $25 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ avec un accroissement du débit de pointe. Le réseau hydrographique favorise cette structure de la réponse du bassin quand seuls réagissent de façon prioritaire les rios PESCADO, NEGRO aval et la Quebrada ACO.

Les hydrogrammes de ces 2 crues et la distribution médiane assez imprécise que l'on peut en extraire figurent aussi sur le tableau n° 4. Le temps de montée n'est plus que de 10 à 15 heures et le débit maximal s'accroît de 40 à 50 % pour atteindre 400 - 480 m^3/s .

25 - Etablissement de la fonction de transfert pluies-débits pour la crue de décembre 1960.

La fonction de transfert pluies-débits repose essentiellement sur les hydrogrammes types choisis. Elle est complètement déterminée quand on connaît en outre :

- la valeur du coefficient de ruissellement et sa variation en fonction de l'importance de la pluie et de l'état d'humidité préalable des terrains.
- la hauteur moyenne de chaque pluie ou l'abattement à appliquer à la pluie maximale ponctuelle.
- l'espacement entre les centres des pluies successives.

La crue des 1, 2 et 3 décembre 1960 est la seule crue importante observée qui, due à une série de précipitations réparties sur 3 jours, offre une complexité suffisante pour essayer les hydrogrammes types choisis et préciser les autres termes de la fonction de transfert.

La reconstitution est effectuée à partir de 3 hydrogrammes déduits de l'hydrogramme type de l'ensemble du bassin et définis par les caractéristiques suivantes des pluies et des coefficients de ruissellement.:

HYDROGRAMMES DE RUISSELLEMENT CARACTERISTIQUES

POUR UN VOLUME DE 25 MILLIONS de m³

=====

A - ENSEMBLE DU BASSIN

heures	- 12 h	- 6 h	Maximum	+ 6 h	+ 12 h	+ 24 h	+ 36 h
crue du 8 mars 1962	22	260	368	273	117	40	11
crues des 12-13 novembre 1959.	15	245	315	267	110	39	16
crues des 14-15 novembre 1959.	40	242	328	187	85	50	30
crues des 19-20 novembre 1959.	55	284	313	270	105	30	5
crue du 1 février 1963. (1)			325				
crue du 28 octobre 1963. (1)			368				
Hydrogramme type médian adapté	30	260	340	270	120	50	15

(1) hydrogrammes aux formes mal connues.

B - PARTIE AVAL DU BASSIN

heures	- 12 h	- 6 h	Maximum	+ 6 h	+ 12 h	+ 24 h	+ 36 h
Crue des 24-25 octobre 1960.	38	345	396	240	85	10	0
Crue des 6 - 8 novembre 1960.	0	36	478	265	65	54	30
Hydrogramme type adopté.	20	180	440	250	70	30	15

N-B. les débits ruisselés sont donnés en m³/s.

Date	pluie moyenne en mm	Espacement entre pluies.	Coefficient de ruissellement en %	Volume de ruiss- sellement (10 ⁶ m ³)
1/12	35		72	37,2
2/12	25	12 h	85	31,5
3/12	20	21 h	95	28,5
Total	80		83 %	97,2

La carte du bassin offre une représentation probable du tracé des isohyètes pour la période de 3 jours.

Le graphique n° 1 montre le résultat très satisfaisant de la reconstitution tant en ce qui concerne le débit maximal (840 pour 820 m³/s) que la forme de la crue. On remarque l'importance des coefficients de ruissellement.

35 - Volumes écoulés lors de phases pluvieuses de longue durée.

Les plus fortes crues, celles de décembre 1960 comme les autres, sont rarement des phénomènes isolés entre des périodes d'étiages mais apparaissent au contraire comme la partie la plus intense d'une séquence d'écoulement abondant de 8 à 15 jours. Cette constatation est évidemment la résultante de celle que l'on peut faire en examinant les relevés de pluies journalières : les précipitations exceptionnelles y surviennent rarement seules mais au contraire volontiers au sein de phases pluvieuses de 8 à 10 jours couvrant d'assez grandes étendues.

Un inventaire des séquences d'écoulement les plus abondantes que l'on ait observées sur le RIO PRADO est donné dans le tableau n° 5. Un total de 300 millions de m³ en 10 jours ne paraît pas être un phénomène excessivement rare si l'on veut bien considérer qu'au cours des 6 jours englobant la crue début décembre 1960, on a vu couler 180 millions de m³ soit une moyenne de 30 millions par jour.

*

* *

De cette analyse des crues du RIO PRADO on peut donc tirer certaines conclusions permettant d'orienter les recherches en vue de déterminer la crue maximale :

- a) deux types de crue sont à craindre, l'un correspond à des précipitations très violentes et localisées à l'aval du bassin, l'autre résultant de pluies moins fortes mais intéressant l'ensemble du bassin.
- b) de toute façon, la crue maximale se manifesterà à l'occasion d'une séquence pluvieuse de 8 à 10 jours sur des terrains saturés et le volume écoulé en sera très notablement accru.

SEQUENCES D'ÉCOULEMENT DE LONGUE DURÉE SUR LE RIO PRADO

Période	Pluie moyenne mm	Ka %	Volum ^o écoulé 10 ⁶ m ³	Ke %	I 10 ⁶ m ³
1-14/12/60	217	64	294	69	21
30/4-15/5/63	207	72	276	92	17,2
22/10-8/11/60	230	58	264	78	14,7
4-17/11/63	248	65	223	62	16
12-23/11/59	160	74	169	72	14,1
9-18/10/62	186	55	151	56	15,1

Ka est le rapport sur la période de la hauteur moyenne de précipitation à la hauteur maximale ponctuelle.

I est l'intensité de l'écoulement, c'est-à-dire le volume moyen journalier.

Ke est le coefficient d'écoulement total.

CHAPITRE 3 - ETUDE DES FORTES PRECIPITATIONS
JOURNALIERES

On commence par recenser les précipitations d'une certaine importance tombées en 24, 48 et 72 heures sur le bassin du rio PRADO et aux alentours ainsi que dans les stations anciennes de comparaison. Les caractéristiques du régime des fortes pluies ainsi définies, on effectue l'inventaire des séquences pluvieuses de 10 jours au maximum dans l'ensemble de la documentation.

31 - Régime des précipitations dans le bassin du rio PRADO

Le recensement a porté sur les pluies supérieures à 60 mm en 24 heures, 70 mm en 48 h et 80 mm en 72 heures.

La fréquence moyenne annuelle d'occurrence de ces fortes pluies pour les stations de la région du PRADO sont données dans le tableau n° 6.

On y constate une division en 3 groupes des stations qui repose sur la situation des postes en altitude et sur leur exposition aux vents dominants :

- a) celles qui jouissent d'un grand nombre de fortes pluies, ACO, LOZANIA et CUNDAY ;
- b) celles qui en sont modérément affectées et qui correspondent à l'aval du bassin ;
- c) celles qui sont rarement le lieu de fortes pluies, au nord du bassin et sur celui du Sumapaz.

Les conclusions de cette analyse sont à compléter et à revoir quand après classement décroissant des fortes pluies, on détermine sur les échantillons les hauteurs de récurrence annuelle en face des maximums observés (tableau n° 7). Les hauteurs atteintes tant à l'intérieur du bassin qu'à l'aval sont du même ordre de grandeur avec une tendance à de plus fortes valeurs pour cette seconde zone (Purificacion).

Tableau n° 6

NOMBRE MOYEN ANNUEL DE FORTES PRECIPITATIONS

DANS LA REGION DU PRADO

Station	Nombre d'années observées	Pluies de 24 h > 60 mm	Pluies de 48 h > 70 mm	Pluies de 72 h > 80mm
PURIFICACION	4	5	5,7	5,2
PRADO	7	3,6	4,2	4,3
BOQUERON	3	4,7	3,7	2,7
ACO	4	11	8,2	10,2
PINALITO	6	2,7	4,4	4,4
DOLORES	3	2,0	3,3	3,3
CUNDAY	7	6,7	6,0	5,9
LOZANIA	5	5,2	8,6	8,2
VILLARICA	4	1,0	1,7	1,7
PANDI	6	0	0,5	0,5
CABRERA	4	0,2	0,5	0,5

Tableau n° 7

RECENSEMENT DES FORTES PRECIPITATIONS DE 1 à 3 JOURS
(Maximums observés, et valeurs de fréquences décennale
et annuelle)

Stations Nb années observées	Pluie de 24 h		Pluie de 48 h		Pluie de 72 h	
	MAX.	F=0,1 F=1	MAX. 1/10	1/1	MAX. 1/10	1/1
A Région du PRADO						
PANDI 6	59	< 50	82	< 70	85	< 80
BOQUERON 3	90	85	127	100	153	110
CABRERA 4	80	< 50	80	< 70	98	< 80
PRADO 7	99	87	147	100	147	115
CUNDAY 7	104	90	155	110	159	130
PURIFICACION 4	110	100	132	110	153	120
DOLORES 3	176	75	208	100	239	105
PINALITO 6	94	82	135	115	186	135
LOZANIA 5	95	90	140	120	210	145
VILLARICA 4	88	62	118	90	128	105
ACO 4	90	90	171	155	171	155

B Stations anciennes de comparaison

BOGOTA CU 22	69	60	< 50	92	85	< 70	98	95	< 80
LA MANUELITA 21	85	80	< 55	89	85	< 70	106	90	< 80
PAJONALES 21	156	150	68	205	190	80	205	190	95
RIO FRIO 21	106	83	50	113	110	71	140	138	80
CALI 9	88		56	88		70	103		80
CONCHA MAZO 20	94	80	45	124	103	55	144	138	70
MUNCHIQUE 15	161	≈ 140	76	219	≈ 200	117	294	250	154
CHINCHINA 16	136	120	77	136	130	100	155	145	120

Tableau n° 7 (suite)

C Autres stations

Stations	Période	Pluie de 24 h		Pluie de 48 h		Pluie de 72 h	
		MAX.	F = 1	MAX.	F = 1	MAX.	F = 1
SALAZAR	3	<u>194</u>	110	<u>243</u>	165	<u>296</u>	192
CHAPARRAL	3	115	91	196	112	210	141
TRUJILLO	3	<u>200</u>	80	227	115	241	150
BLONAY	7	113	72	124	100	180	120
E. JARAMILLO	7	110	71	118	90	135	115
LIBANO	7	145	92	173	105	205	130
TIBACUY	6	81	60	95	75	100	85
LA FLORIDA	7	84	65	106	80	123	100
NARANJAL	6	84	70	114	90	153	120
DOS QUEHADAS	5	95	70	150	100	161	120
LA BELLA	6	108	85	145	105	172	125
LA PALMA	6	104	65	146	90	182	115

Le recensement suivant les mêmes critères des fortes précipitations dans les stations de référence amène une division du même type entre :

- a) les stations recevant peu de fortes averses comme BOGOTA, LA MANUELITA, RIO FRIO, CONCHA, MAZO et CALI ;
- b) les stations où se produisent de fortes pluies telles que CHINCHINA, AMBALEMA-PAJONALES et MUNCHIQUE.

On trouve pour ces stations les valeurs maximales observées et celles de récurrences annuelle et décennale sur le tableau n° 7 ; un même recensement a été fait pour les stations de la région andine des plantations de café (annuaires de la F.N. des Cafeteros) et figure sur le même tableau en-dessous de CHINCHINA.

Les hauteurs trouvées pour les stations du PRADO et les postes de comparaison sont du même ordre de grandeur ce qui autorise à supposer que les régimes des fortes précipitations y sont semblables.

C'est évidemment parmi le groupe des stations objet de fréquentes et fortes précipitations qu'il faut orienter les recherches, sans négliger bien entendu l'autre groupe.

La station de PAJONALES étant la plus proche du bassin du PRADO parmi les postes bien arrosés et d'observations étendues sur près de 20 ans, il a paru opportun de clore cet examen du régime des fortes pluies journalières en procédant à l'analyse statistique complète des pluies de 24 heures en ce lieu.

On peut ajuster sur un tel échantillon une loi de la forme :

$$G(x) = \frac{F(x) - F_0}{1 - F_0} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{u^2}{2}} du$$

$$\text{avec } u = \frac{\log x - \overline{\log x}}{\sigma_{\log x}}$$

dans laquelle la variable suivant une loi normale est le logarithme népérien de la hauteur de précipitation. La loi est en outre tronquée pour éliminer les jours sans pluie et ceux de très faibles pluies dont l'appréciation malaisée n'est jamais excellente et nuit à l'ajustement sur les fortes pluies qui sont les seules intéressantes en l'occurrence.

Le choix de la fréquence de troncage se fait graphiquement de façon à aligner le mieux possible les points représentant les pluies classées par tranches de 10 mm portés sur un papier gaussien logarithmique et dont les fréquences expérimentales brutes et tronquées sont calculées à partir de l'échantillon comme le montre le tableau n° 8.

Les paramètres déduits de l'ajustement graphique sont les suivants :

$$F_0 = 0,15$$

$$\overline{\text{Log } x} = 2,60$$

$$\overline{\text{Log } x} = 0,835$$

Pour des fréquences exceptionnelles cette loi donne les résultats suivants :

10 ans	152 mm
100 ans	265 mm
500 ans	370 mm

Généralement au-delà de cent ans, l'ajustement a tendance à être un peu fort aussi faut-il considérer la dernière estimation comme de récurrence supérieure à 500 ans.

32 - Détermination du hyétogramme enveloppe de la séquence pluvieuse de longue durée

L'ensemble des stations pluviométriques analysées ci-dessus représente 265 ans de relevés si l'on se permet d'y appliquer la méthode des stations-années en considérant que les phénomènes intenses observés en chacune d'elles sont indépendants. Ceci est admissible en ne retenant que des phénomènes survenus à des dates différentes.

On donne dans le tableau n° 9 la hauteur totale de pluies recueillies durant 1 à 9 jours en certains postes particulièrement arrosés. A partir de 10 jours les précipitations sont généralement interrompues par des jours sans pluie en nombre suffisant pour admettre que cette durée représente le maximum probable pour une séquence continue de pluies.

La séquence la plus abondante est celle de 545 mm à MUNCHIQUE ; elle peut être considérée a priori comme un phénomène de période de retour supérieure ou égal à 265 ans.

Pour obtenir une séquence maximale de récurrence très rare, il faut considérer dans leur répartition journalière les principales séquences observées et en établir l'enveloppe compte tenu de la forme la plus vraisemblable de la répartition des pluies au sein de la séquence.

Cette maximisation du hyétogramme enveloppe de la séquence pluvieuse se fait en plaçant les diverses séquences observées afin d'avoir l'enveloppe la plus serrée possible (forme ajustée à celle des observations et total des pluies maximal).

Tableau n° 8

ANALYSE STATISTIQUE DES PLUIES JOURNALIERES A PAJONALES (21 ans)

Limites de classes en mm	Nombre de pluies observées	Fréquence brute F (x)	Fréquence tronquée G(x) pour Fo = 0,15
0	1 547	0,22401	
10	671	0,09716	0,648
20	353	0,05111	0,341
30	188	0,02722	0,181
40	101	0,01462	0,0975
50	58	0,008398	0,0560
60	31	0,004489	0,0299
70	17	0,002462	0,0164
80	15	0,002172	0,0142
90	10	0,001448	0,0096
100	6	0,000869	0,0058
125	4	0,000570	0,0039
150	3	0,000434	0,0029

Cette opération a été entreprise sur les 7 plus fortes séquences observées, celle de LOZANIA n'étant pas retenue car les pluies infimes tombées aux autres postes du PRADO à la même époque mettent le doute sur la véracité de cette séquence... qui n'a donné aucun écoulement à Puente Casabianca.

Le tableau n° 10 en donne une représentation. L'enveloppe est prise jour par jour en augmentant de 10 % le maximum journalier arrondi à 5 mm près.

On arrive à un total de 895 mm en 10 jours, soit 64 % de plus que la plus forte séquence observée. Au centre de la séquence maximale se place une épisode intense de 3 jours : 120-120 et 220 mm soit au total 460 mm (55 % de plus que le maximum observé).

L'application à cette séquence enveloppe de la fonction de transfert pluies débit du bassin du PRADO mise en évidence au Chapitre 2 doit conduire à la crue maximale probable.

HAUTEURS TOTALES DE PRECIPITATIONS RECUEILLIES EN UN A NEUF JOURS - (mm) Tableau n° 9

Station	Nbre de j.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CUNDAY			155							
DOLORES		176	208	239	239	239	256			
LOZANIA				210	(340)	(390)	(430)	(430)	(520)	(565)
PAJONALES		156	205	205	205	241				
BLONAY				165	208	247	288	317	328	369
LIBANO		143	173							
CHINCHINA		136								
TRUJILLO		<u>200</u>	227	241						
SALAZAR		194	<u>243</u>	<u>296</u>	317	<u>383</u>	389	425	427	457
MUNCHIQUE		161	219	294	<u>339</u>	380	<u>409</u>	<u>497</u>	<u>524</u>	<u>545</u>

La séquence pluvieuse de 4 à 9 jours observée à LOZANIA en Janvier 1965 est douteuse.

CONSTITUTION DU HYETOGRAMME ENVELOPPE DE 10 JOURS - (mm)

Tableau n° 10

Station	Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 jours
TRUJILLO	Avril 1953		5	20	28	1	14	<u>200</u>	27	14	7
SALAZAR	Mai 1957	<u>30</u>	2	81	34	25	49	194	6	36	
MUNCHIQUE	Janv. 1960			<u>88</u>	29	75	58	161	45	41	27
SALAZAR	Oct. 1958		0	47	21	<u>109</u>	97	90	0		
AMBALEMA	Mai 1950		49	48	36	0	<u>108</u>	0	6	<u>69</u>	<u>59</u>
DOLORES	Mai 1959		3	0	1	31	32	176	0	0	17
BLONAY	Oct. 1954		6	11	<u>41</u>	39	66	49	<u>50</u>	43	29
LOZANIA	Janv. 1965		40	80	90	90	80	50	0	90	45
Enveloppe adoptée		35	55	100	45	120	120	220	55	80	65

CHAPITRE 4 - ESTIMATION DE LA CRUE MAXIMALE PROBABLE

La mise en application de la fonction de transfert pluies-débits sur la séquence pluvieuse enveloppe que nous venons de préciser nécessite le choix de certaines hypothèses complémentaires. Il est évident que la crue maximale probable sera le fait des 3 journées les plus pluvieuses du centre de la séquence enveloppe survenant après 4 jours de précipitations non négligeables ayant saturé les terrains.

Pour l'ensemble de la séquence enveloppe, on évaluera simplement le volume écoulé chaque jour.

41 - Hydrogramme de la crue maximale

On se contente donc d'élaborer les hypothèses complémentaires d'application de la fonction de transfert relatives aux 3 journées centrales. Après plusieurs essais, le ruissellement maximal est obtenu en considérant que les 3 pluies sont homogènes, et ont leur épicycle sur l'axe central privilégié du bassin ACO-LOZANIA-CUNDAY. Ceci nous amène à adopter un coefficient d'abattement de 65 % (plus forte valeur observée) puisque le hétérogramme enveloppe est évidemment un phénomène ponctuel.

En supposant que la deuxième pluie survient 24 heures après la première et que la troisième lui succède 12 heures après, on arrive à grouper en guère plus de 24 heures 340 mm soit un total presque équivalent à la précipitation de récurrence supérieure à 500 ans à PAJONALES, ce qui constitue une confirmation de la validité et de la rareté du centre du hétérogramme enveloppe choisi.

Chaque pluie est enfin supposée donner lieu à un hydrogramme type médian correspondant à l'ensemble du bassin, avec des coefficients de ruissellement croissant de 75 à 95 %.

Le détail de la composition de l'hydrogramme de la crue maximale est présenté dans le tableau suivant :

Jour	Pluie ponctuelle (mm)	Ka %	Pluie moyenne (mm)	Espacement en heures	Kr %	Vr 10 ⁶ cm ³
1	120	65	78	-	75	84,8
2	120	65	78	24	85	96
3	220	65	143	12	95	197

Le graphique n° 2 montre la composition des 3 hydrogrammes-types de ruissellement avec un débit de base croissant de 100 à 200 m³/s.

La crue maximale présente un hydrogramme à 2 pointes dont les caractéristiques essentielles sont les suivantes :

Durée d'écoulement	4 jours
Débit maximal	<u>3 500 m³/s</u> ou 2 400 l/s km ²
Volume ruisselé	<u>378 10⁶ m³</u>

Nous avons contrôlé le peu de vraisemblance d'apparition de la crue maximale à partir d'autres conditions pluviométriques. Une hypothèse concevable aurait été l'occurrence d'une pluie très violente mais localisée à l'aval du bassin.

Dans cette optique les valeurs suivantes auraient pu être retenues :

- a) précipitation ponctuelle de 370 mm tombant en 2 épisodes de 100 et 270 mm séparés de 6 heures
- b) abattement spatial de 45 % - maximum observé pour des chutes de pluie localisées sur l'aval du bassin
- c) coefficients de ruissellement de 75 et 85 %
- d) hydrogramme type court et intense représentatif de l'aval.

Les résultats sont inférieurs à ceux de l'hypothèse précédente : 3350 m³/s de pointe et 200 millions de m³ en 48 heures.

42 - Volumes écoulés pendant la séquence pluvieuse de 10 jours

Les précipitations encadrant la phase intense de 460 mm, responsable de la crue maximale calculée ci-dessus, totalisent 435 mm, soit 235 mm pendant les 4 jours précédents et 200 mm durant les 3 derniers jours.

Ces précipitations vont provoquer des écoulements importants qui vont au début relever le plan d'eau de la retenue avant l'arrivée de la crue maximale et à la fin gêner l'évacuation et l'amortissement de celle-ci. Elles constituent donc pour la phase intense de la crue maximale un encadrement abondant qu'il importe de bien connaître pour que les caractéristiques de l'aménagement à déterminer (niveau supérieur du plan d'eau, revanche, débit de l'évacuateur) puissent permettre le passage de cette crue maximale sans dommages, si elle venait à se produire.

Pour ces précipitations secondaires, on a gardé l'hypothèse de centrage sur l'axe ACO-CUNDAY avec abattement de 65 %, les volumes écoulés par jour ont été déterminés à l'aide de coefficients de ruissellement choisis en fonction de l'état d'humidité des terrains et de la hauteur de la précipitation, et variant de 50 à 80 %.

Le résumé des calculs pour les 10 jours de la séquence pluvieuse, y compris l'épisode central, est donné dans le tableau n° 11.

Au total l'écoulement atteint 718 millions de m³ en 10 jours. Ce volume représente à peu près 55 % de la précipitation maximale ponctuelle étendue à l'ensemble du bassin, c'est-à-dire 84 % de la pluie moyenne supposée égale à 65 % de la pluie maximale.

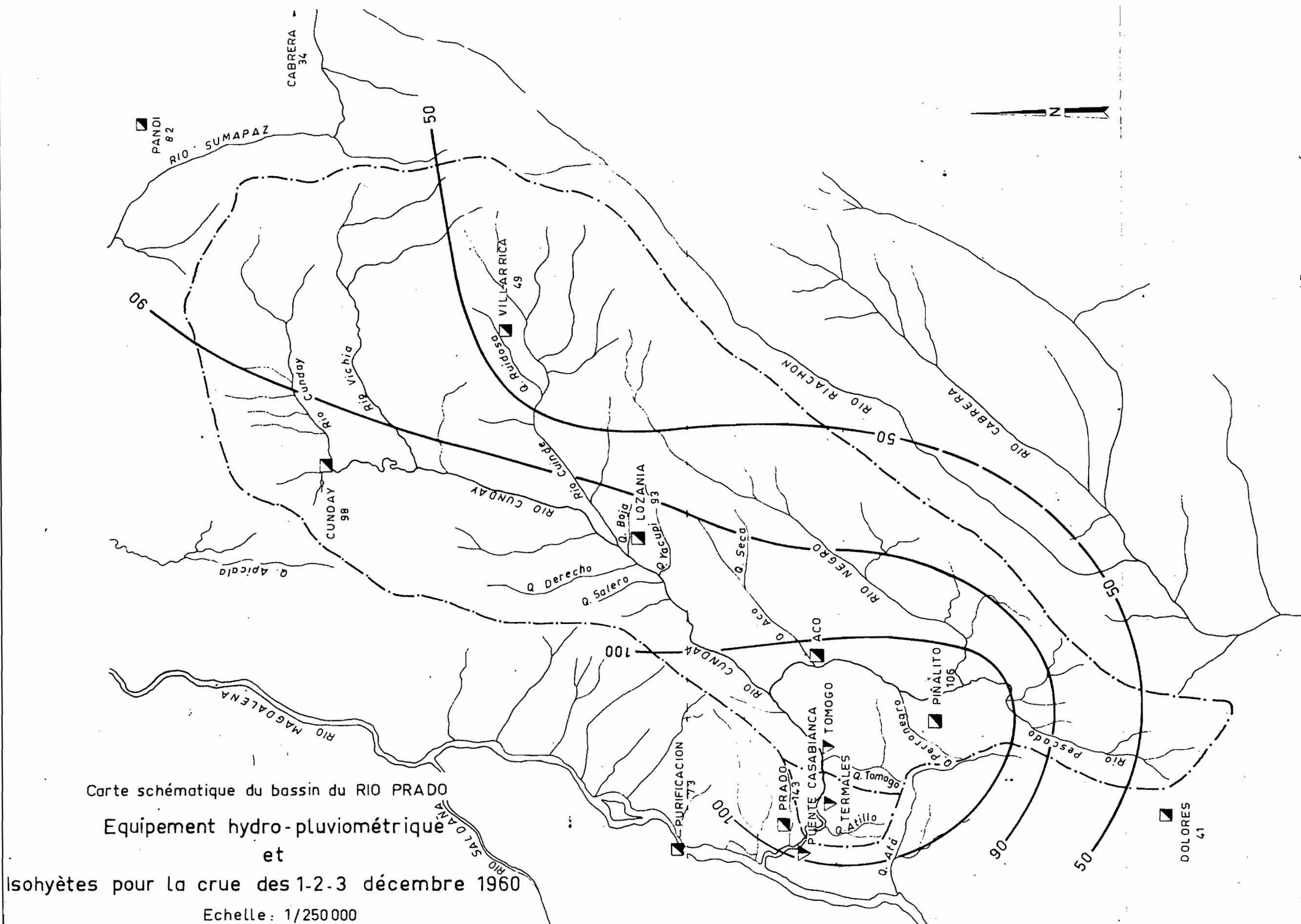
Ici comme pour les coefficients de ruissellement les valeurs adoptées paraissent très fortes. Il faut tenir compte du fait qu'elles ont été choisies après analyse de la crue de décembre 1960 et que leur exagération vraisemblable compense simplement une tendance à la sous-estimation de la pluie moyenne observée sur le bassin due à une insuffisance en pluviomètres. On peut penser qu'avec un réseau 3 ou 4 fois plus dense de pluviomètres, la pluie moyenne apparaîtrait moins réduite vis-à-vis de la pluie maximale (coefficient d'abattement supérieur à 65 %) et qu'en conséquence les coefficients de ruissellement et d'écoulement seraient plus faibles ; de cette manière, les produits Ka-Kr et Ka-Ke "coefficients de transfert globaux" restent constants et équivalents à ceux que l'analyse de la crue de Décembre 1960 a mis en évidence.

CALCUL DES VOLUMES ECOULS PENDANT LA SEQUENCE PLUVIEUSE MAXIMALE

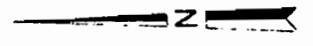
Jour	P _{max} mm	Ka en %	P _m mm	V _p 10 ⁶ m ³	Ke en %	Ve 10 ⁶ m ³	Volumes cumulés 10 ⁶ m ³
1	35	0,65	23	33	50	16	16
2	55	0,65	36	52	60	30	46
3	100	0,65	65	94	70	66	112
4	45	0,65	29	42	80	33	145
5	120	0,65	78	113		80	225
6	120	0,65	78	113	95	183	408
7(1)	220	0,65	143	207		147	555
8(2)	55	0,65	36	52	80	42+13	610
9	80	0,65	52	75	80	60	670
10	65	0,65	42	61	80	48	<u>718</u>

(1) Pendant les 3 jours de l'épisode central intense, l'écoulement est de 410 millions de m³

(2) 13 millions de m³ proviennent de la fin du ruissellement du 7e jour, dernier jour de la crue maximale.

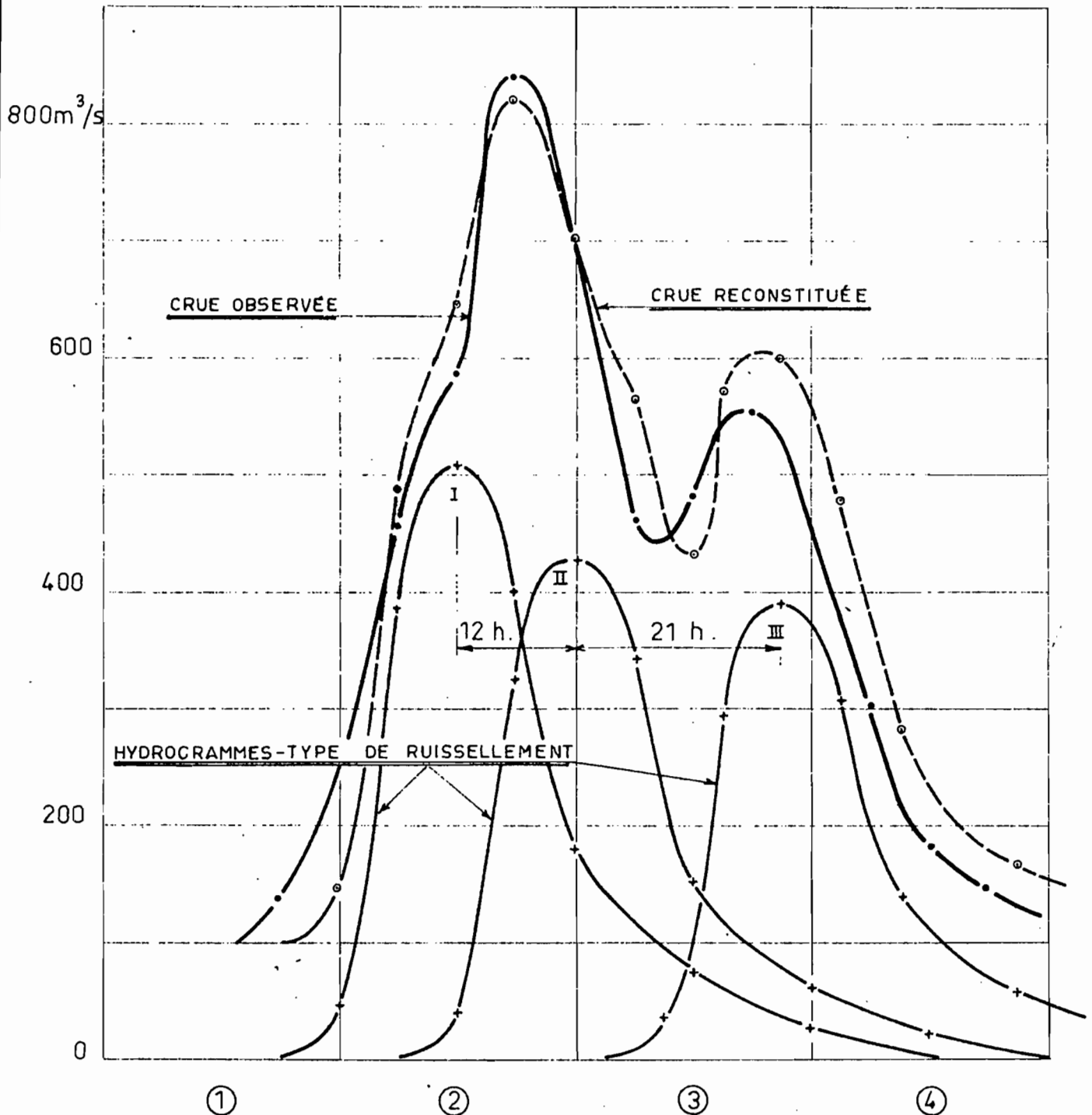


■ POSTE PLUVIOMÉTRIQUE
 ▼ STATION HYDROMÉTRIQUE



Carte schématique du bassin du RIO PRADO
 Equipement hydro-pluviométrique
 et
 Isohyètes pour la crue des 1-2-3 décembre 1960
 Echelle: 1/250 000

Reconstruction de la crue de décembre 1960 du RIO PRADO à PUENTE CASABIANCA



Construction de la crue maximale probable

du RIO PRADO

