

République Française

Ministère des Affaires Économiques

Mission Française de Coopération Technique

SCEJ - Coopération

République des États-Unis

du BRÉSIL

Surintendance du Développement

du Nord-Est - SUDENE

Groupe d'Études du Val du JAGUARIBE

Étude Hydrologique Sommaire
du Régime du RIO SALGADO

par

Pierre DUBREUIL

Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer

Section Hydrologique - Mars 1964

REPUBLIQUE FRANCAISE

MINISTERE des AFFAIRES ECONOMIQUES

MISSION FRANCAISE de COOPERATION TECHNIQUE
SCET - COOPERATION

REPUBLIQUE des ETATS-UNIS
du BRESIL

SURINTENDANCE du DEVELOPPEMENT
du NORD-EST SUDENE

GRUPE d'ETUDES du VAL du JAGUARIBE

ETUDE SOMMAIRE du REGIME HYDROLOGIQUE du RIO SALGADO

par

Pierre DUBREUIL

Maître de Recherches à l'ORSTOM
Expert Consultant auprès du GEVJ



20 AOUT 1970

OFFICE de la RECHERCHE SCIENTIFIQUE et TECHNIQUE OUTRE-MER
Service Hydrologique - Mars 1964

D8
DUB

9931

S O M M A I R E

	Page
<u>INTRODUCTION</u> -	1
<u>CHAPITRE I</u> - <u>APERÇU des PRINCIPAUX CARACTERES PHYSICO-CLIMATIQUES du BASSIN</u> -	3
11 - Les caractères physiques du bassin	3
12 - Le climat régional	5
<u>CHAPITRE II</u> - <u>Les DONNEES d'OBSERVATIONS HYDROMETRIQUES</u> -	8
21 - Station de LAVRAS de MANGABEIRA (8 480 km ²)	8
22 - Station du Sitio dos PATOS (9 305 km ²)	12
23 - Station d'ICO (11 920 km ²)	14
24 - Station de SANTO ANTONIO (10 530 km ²)	17
25 - Station de QUIMAMI sur le haut SALGADO ou rio CARAS (1 853 km ²)	18
<u>CHAPITRE III</u> - <u>Les ECOULEMENTS MENSUELS et ANNUELS</u> -	20
31 - Détermination des débits - Les tarissements	20
32 - Les modules annuels - Corrélations hydropluviométriques	24
33 - Les débits moyens mensuels	35
34 - Coefficients et déficits annuels d'écoulement	37
35 - Signification des observations hydrométriques non retenues à LAVRAS	37
<u>CHAPITRE IV</u> - <u>ETUDE des FORTES CRUES</u> -	
41 - Formation et caractère des principales crues observées	41
42 - Hyétogramme-enveloppe de l'épisode pluvieux intense	45
43 - Choix d'un mécanisme de transformation "pluie-écoulement"	46
44 - Détermination de la crue maximale probable	50
45 - Analyse statistique des plus fortes crues observées	52
<u>CONCLUSION</u> -	58

BIBLIOGRAPHIE -

A l'intérieur du "Polygone de la sécheresse" dans le Nord-Est brésilien, la politique d'aménagement hydraulique est l'oeuvre du Département National des Ouvrages contre la Sécheresse (D.N.O.C.S.). Dans le bassin du JAGUARIBE, proprement dit, cet organisme a réalisé ces dernières années de nombreux travaux d'emmagasinement des eaux de surface. Les deux principaux barrages, ceux d'OROS et de BANABUIU, dont l'exécution est en cours d'achèvement, vont permettre, grâce aux capacités de leurs retenues supérieures au milliard de m³, de juguler les crues dévastatrices des rios JAGUARIBE et BANABUIU.

Dernier grand cours d'eau sauvage du bassin, le rio SALGADO peut, par ses seules crues, causer des préjudices importants le long de la vallée en aval et plus particulièrement à la plaine d'ICÓ et à la zone de la basse vallée qui constituent deux îlots de prospérité agricole dont l'accroissement de la productivité est envisagé dans un proche avenir à l'aide d'un développement organisé de l'irrigation, lequel implique une maîtrise quasi complète de l'écoulement des eaux de surface.

Le D.N.O.C.S. a déjà reconnu quelques sites de barrage possibles en amont d'ICÓ (CASTANHERO entre autres). L'établissement de l'avant-projet définitif sera grandement facilité par la connaissance des données de base sur le régime du fleuve.

Le Groupe d'Etudes du Val du JAGUARIBE (G.E.V.J.) possède une section hydrologique dont l'une des principales missions est la rédaction d'une monographie hydrologique du bassin du JAGUARIBE, en collaboration avec l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (O.R.S.T.O.M.).

La sortie de cet ouvrage est prévue pour le milieu de l'année 1965. Pour satisfaire rapidement les désirs du DNOCS, nous avons accepté d'effectuer une étude rapide du régime hydrologique du rio SALGADO. Mais actuellement et dans les délais qui nous sont impartis, nous ne disposons pas de la totalité des documents d'observations sous une forme élaborée et utilisable. Le rapport que nous avons ainsi établi ne prétend donc pas former une monographie exhaustive du rio SALGADO, mais représente seulement une première ébauche sommaire dont les conclusions restent susceptibles d'être légèrement modifiées lorsque sera réalisée la monographie d'ensemble du bassin du JAGUARIBE.

Nous avons tenu ici à ne donner qu'un aperçu rapide des caractères physico-climatiques du bassin versant. L'essentiel des études a porté sur l'inventaire historique des documents hydrométriques et leur interprétation en vue de dégager les données quantitatives essentielles du régime hydrologique : modules annuels, débits moyens mensuels et crues exceptionnelles.

Ruy NOBREGA, Ingénieur hydrologue brésilien travaillant au G.E.V.J, a participé aux études préparatoires à la rédaction de ce rapport, lors de son stage en France au Bureau Central d'Hydrologie de l'ORSTOM.

LE BASSIN DU RIO SALGADO

La Région Sédimentaire



Paysage du CARIRI
A l'arrière plan, la CHAPADA de ARARIPE



Lit du Rio Carás (ou Salgadinho)
Près de JUAZEIRO do NORTE en Juin

La Région Cristalline



Aspect général de la CAATINGA
en fin de saison sèche



Relief cristallin près de LAVRAS en saison sèche

C H A P I T R E I

APERCU des PRINCIPAUX CARACTERES PHYSICO-CLIMATIQUES du BASSIN

Documents cartographiques utilisés :

- a) la carte à l'échelle du 1/500 000^o de l'Etat du CEARA de 1955 avec indication figurative des courbes de niveau équidistantes de 100 m -
- b) les fonds planimétriques à l'échelle du 1/250 000^o de la L.A.S.A. établis en 1962 par exploitation d'une couverture aérienne verticale (1956-59).

Ils ont permis le dessin de la carte du bassin du rio SALGADO à l'échelle du 1/500 000^o (hors texte) portant mention :

- des limites partielles de bassins versants
- du réseau hydrographique principal
- des stations pluviométriques et hydrométriques
- des terrains sédimentaires.

11 - Les CARACTERES PHYSIQUES du BASSIN -

On trouvera, rassemblées dans les tableaux n^o 1 et 2, les données quantitatives sur les superficies des bassins partiels d'une part, la forme, l'hypsométrie et la répartition des terrains géologiques en ce qui concerne les 3 principaux bassins partiels, d'autre part.

Il importe de mettre l'accent sur l'hétérogénéité géologique qui se manifeste, au centre d'une région cristalline imperméable, par l'existence d'une zone sédimentaire perméable dans le haut bassin : grès et calcaires crétacés y forment un haut plateau tabulaire, la Chapada de ARARIPE, dominant

TABLEAU N° 1

SUPERFICIES des BASSINS VERSANTS du RIO SALGADO

(Carte au 1/250 000^e de la L.A.S.A.)

Descriptif	Bassin partiel	Bassin total
Rio SALGADO à Sitio LAPINHA	1 812 km ²	1 812 km ²
Rio SALGADO à QUIMAMI	1 853 km ²	1 853 km ²
Rio DOS PORCOS à MILAGRES	3 534 km ²	
Rio DOS PORCOS au confluent du SALGADO:	4 005 km ²	
Rio SALGADO aval de QUIMAMI		5 858 km ²
Rio SALGADO entre QUIMAMI et LAVRAS	2 622 km ²	
Rio SALGADO à LAVRAS de MANGABEIRA		8 480 km ²
Rio SALGADO de LAVRAS à PATOS	825 km ²	
Rio SALGADO à SITIO dos PATOS		9 305 km ²
Rio SALGADO de PATOS à Sto ANTONIO	1 225 km ²	
Rio SALGADO à SANTO ANTONIO		10 530 km ²
Rio SALGADO de Sto ANTONIO à ICÓ	1 390 km ²	
Rio SALGADO à ICÓ		11 920 km ²
Rio SALGADO au confluent du Rio JAGUARIBE	525 km ²	12 445 km ²

TABLEAU N° 2

CARACTERES PHYSIQUES QUANTITATIFS

Caractère	Haut SALGADO à: QUITAMI	SALGADO Moyen: à LAVRAS	SALGADO Inférieur: à ICÓ
1) <u>Forme</u>			
Coefficient de compacité			
$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{S}}$	1,39	1,28	1,36
2) <u>Hypsométrie</u>			
(en % de la surface)			
500 à 750 m	51 %	35 %	24 %
500 à 200 m	49 %	65 %	71 %
200 à 150 m	-	-	5 %
Altitude minimale approximative	290 m	230 m	150 m
3) <u>Géologie</u>			
Terrains sédimentaires: crétacés	4 502 km ² 77 %	4 502 km ² 53 %	4 600 km ² 38,5 %
Terrains cristallins (antécambrien indif- férencié)	1 356 km ² 23 %	3 978 km ² 47 %	7 320 km ² 61,5 %

de 200 à 300 m les plaines et collines inférieures qui s'étendent de CRATO à MILAGRES et BREJO-SANTO. Outre ce massif gréseux, le relief ne dépasse la cote 700 mètres qu'occasionnellement dans les terrains cristallins :

- a) avec la serra SAN PEDRO orientée Est-Ouest entre INGAZEIRAS et DON QUINTINO environ -
- b) avec les sommets de quelques serras limitant le bassin à l'Est depuis le Sud de JATI jusqu'à ANAÚA puis de FELIZARDO à ICOZINHO.

Le réseau hydrographique de la zone cristalline possède un chevelu très dense et régulièrement ramifié. La végétation naturelle arbustive à caractère xérophytique marqué, la "caatinga", ne couvre qu'imparfaitement le sol ; la présence humaine y est faible (environ 10 à 30 habitants au km²) et se manifeste sous la forme d'un élevage extensif ; elle ne se stabilise que dans de petits îlots de culture au fond des vallées, près des points d'eau pérennes.

La violence du ruissellement et de l'érosion, favorisée par la pente notable du sol, s'y donne libre cours. Le réseau hydrographique principal est constitué de lits torrentiels, remplis d'alluvions grossières, démesurément larges. La disposition est en épi caractéristique, de part et d'autre du SALGADO occupant l'axe central Sud-Nord, le long des 2 directions structurales tectoniques dominantes Sud-Sud-Ouest - Nord-Nord-Est et Est-Sud-Est - Ouest-Nord-Ouest.

En amont de QUIMAMI, l'influence des terrains sédimentaires modifie le paysage. On ne trouve des thalwegs prononcés, denses et d'aspect torrentiel, que sur les versants de la Chapada. Il n'y a pas d'écoulement superficiel sur le plateau. Dans les plaines, la rupture de pente brutale provoque l'alluvionnement des petits cours d'eau que favorise, en outre, le développement des cultures riches irriguées, sous la pression d'une population rurale très dense (de 40 à plus de 100 habitants au km²).

Alluvionnement et débordement diminuent la force hydraulique des cours d'eau dont les lits paraissent sous-dimensionnés en regard des surfaces drainées et par comparaison avec la zone cristalline.

Cette dualité géologique, que met aisément en évidence un rapide examen géomorphologique, s'accroîtra en quelque sorte sur le plan quantitatif des écoulements. L'analyse des débits de 1963 a confirmé la part réduite de la zone sédimentaire dans la constitution des écoulements du rio SALGADO et son influence quasi nulle dans la formation des crues exceptionnelles.

12 -- Le CLIMAT REGIONAL --

La conjonction des mouvements annuels des masses d'air sèches (hautes pressions tropicales atlantiques) et humides (basses pressions équatoriales nord et amazoniennes) impose un régime des précipitations à saison sèche bien marquée dont le caractère "tropical" peut prendre des aspects semi-arides certaines années. La présence de la mer (240 km d'ICÓ à vol d'oiseau) et la latitude équatoriale (7° Sud) adoucissent le climat tropical dû au régime des pluies, ce qui est assez manifeste au niveau des températures et des humidités.

Dans le bassin du SALGADO, si le climat est homogène, l'altitude (au-dessus de 500 mètres) et la pluviosité (région du CARIRI, de CRATO à MISSÃO VELHA) y introduisent quelques nuances perceptibles à l'examen des relevés de JUAZEIRO do NORTE comparativement à ceux d'IGUATÚ ou de LIMA CAMPOS, représentatifs de l'ensemble du bassin (tableau n° 3).

La synthèse des études pluviométriques dans le bassin du JAGUARIBE sera donnée dans la monographie de ce bassin. Nous nous contenterons ici de rappeler certains faits d'observations déjà publiés et d'esquisser les éléments d'une analyse statistique des hauteurs annuelles de précipitations.

Nous disposons actuellement de documents élaborés, dont l'analyse d'homogénéité des relevés a été terminée, pour 6 stations dont la répartition dans le bassin du SALGADO permet d'en donner une bonne vision panoramique générale. On trouvera les moyennes mensuelles et annuelles de la période de référence 1918-58 pour 5 de ces stations dans le tableau n° 4.

Il existe, en outre, 10 stations auxquelles les relevés datent de plus de 20 ans. Le réseau pluviométrique actuel, reconstitué en 1961, comprend environ 37 postes sur l'ensemble du bassin, soit 1 pour 320 km², ce qui est une densité assez satisfaisante.

TABLÉAU N° 3

PRINCIPALES DONNÉES CLIMATIQUES

Stations	IGUATÚ	LIMA CAMPOS	JUAZEIRO do NORTE
1) <u>Températures</u>			
Période 1957-61			
Moyenne annuelle	27°7		26°6
Maximums mensuels des T _x	36° (Novembre)		36° (Nov.-Déc.)
Maximums mensuels des T _n	24°5 (Décembre)		23°6 (Décembre)
Minimums mensuels des T _x	31°3 (Mars-Avril)		30°6 (Juin)
Minimums mensuels des T _n	21°3 (Juillet)		18°9 (Juillet)
2) <u>Humidités</u>			
Période 1957-61			
Maximums mensuels U ₁₂	83 % (Mars)		79 % (Mars)
Maximums mensuels U ₁₈	61 % (Mars)		62 % (Mars)
Minimums mensuels U ₁₂	55 % (Octobre)		53 % (Octobre)
Minimums mensuels U ₁₈	34 % (Septembre)		32 % (Septembre)
3) <u>Evaporation sur bac de classe A</u>			
Période 1961-62			
Total annuel		2950 mm	2750 mm
Moyennes mensuelles maximales		10-11 mm/j (Novembre)	10 mm/j (Octobre)
Moyennes mensuelles minimales		5,5 mm/j (Avril)	5,5 mm/j (Avril)

TABLEAU N° 4

REPARTITION MENSUELLE des PRECIPITATIONS
(mm)

(Période 1918-58)

Station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total annuel
CRATO	132	197	292	163	61	17	8	3	14	22	48	81	1 038
BREJO SANTO	103	170	218	141	46	22	10	4	5	19	54	70	862
VARZEA ALEGRE	96	192	239	177	61	26	8	4	8	16	23	50	900
AURORA	88	166	220	175	58	19	5	1	6	14	24	39	815
UMARI	72	136	204	151	70	30	12	7	5	6	18	27	738

Il peut pleuvoir d'Octobre à Juin, mais en fait, la saison des pluies n'est vraiment nette que durant les 3 ou 4 mois de Février à Avril (et Janvier dans le CARIRI) qui reçoivent en moyenne plus de 100 mm.

Le début de cette saison des pluies, pris le jour où 10 % du total annuel est tombé à partir du 1er Octobre, varie de la première quinzaine de Décembre au Sud d'une ligne reliant JUAZEIRO à MAURITI à la deuxième quinzaine du même mois dans la zone située entre cette ligne et une deuxième ligne reliant MANGABEIRA à FELIZARDO, et enfin à la première quinzaine de Janvier pour la partie septentrionale du bassin.

Le total annuel des précipitations dépasse partout 700 mm et s'élève vers le Sud et en altitude jusqu'à plus de 1 000 mm. En utilisant un indice pluviométrique établi pour l'analyse des écoulements, à partir des moyennes des 6 stations de base, on trouve des hauteurs moyennes, pour la période 1918-58, supérieures à 900 mm sur le bassin sédimentaire du Haut SALGADO et respectivement égales à environ 880 et 860 mm pour les bassins partiels limités à LAVRAS et à ICÓ.

Un tracé estimatif des isohyètes interannuelles figure sur la carte hors texte.

Les valeurs moyennes cachent l'extrême irrégularité interannuelle du régime des précipitations. Pour les 6 stations de base, l'écart-type des séries de 41 totaux annuels de pluie atteint des valeurs de 270 à 340 mm et le coefficient de variation dépasse partout 0,32. Par le fait de cette irrégularité, et contrairement à la règle générale des régions tropicales recevant de 800 à 1 000 mm de pluies par an, les hauteurs annuelles de précipitations ne suivent une loi normale à aucune des 6 stations.

La correction de cette distorsion se fait en introduisant, comme nouvelle variable, la racine carrée de la hauteur annuelle de précipitations ; celle-ci suit une loi de GAUSS aux 6 stations. Les résultats de cette analyse figurent sur le tableau n° 5. On y a présenté les hauteurs annuelles décennales, cinquantenaires et centenaires calculées à partir de ces ajustements pour les 6 stations.

La semi-aridité occasionnelle du régime des pluies apparaît à l'examen de certains chiffres : les valeurs cinquantenaires sèches ont été nettement dépassées au cours de la période d'observations (environ 50 ans) soit en 1913, soit en 1919 à toutes les stations et les valeurs centenaires sèches atteintes à UMARI et VARZEA ALEGRE.

TABLEAU N° 5

ANALYSE STATISTIQUE des HAUTEURS ANNUELLES de PRECIPITATIONS

(\sqrt{P} suit une loi de GAUSS)

Station	\bar{P}	σ_P	C_V	\sqrt{P}	$\sigma\sqrt{P}$	P (χ^2)	$P_{0,99}$	$P_{0,95}$	$P_{0,90}$	$P_{0,10}$	$P_{0,05}$	$P_{0,01}$
CRATO	1 038	339	0,327	31,7	5,2	6,10 (> 10 %)	386	535	627	1 471	1 621	1 914
BREJO SANTO	862	294	0,341	29	5,0	7,80 (10 %)	303	432	511	1 253	1 385	1 648
VARZEA ALEGRE	901	292	0,324	29,6	4,9	1,90 (3% 90 %)	332	464	544	1 287	1 418	1 679
UMARI	738	271	0,367	26,8	4,7	6,42 (> 10 %)	253	363	432	1 076	1 193	1 374
MILAGRES	976	313	0,321	30,85	4,96	3,53 (> 10 %)	372	515	601	1 383	1 521	1 798
AURORA	816	295	0,361	28,10	5,14	0,86 (> 10 %)	260	386	463	1 203	1 337	1 606

N.B. -- Sauf pour la colonne consacrée au test du χ^2 , les valeurs sont des millimètres.

Il va de soi que l'irrégularité interannuelle est encore plus prononcée à l'échelle des précipitations mensuelles ; leur analyse statistique, non effectuée, nécessiterait peut-être une correction plus accentuée que celle de la racine carrée (racine cubique ou logarithme).

De nombreux auteurs ont déjà signalé que les sécheresses venaient rarement seules et au hasard, mais suivant des pseudo-périodes apparemment liées au cycle solaire de 11 ans, et que des "séries noires" de plusieurs années étaient à redouter.

Dans cette étude préliminaire, nous ne pourrions pas remonter au-delà de notre période cinquantenaire d'observations, mais il est certain que nous utiliserons ultérieurement les relevés pluviométriques plus que centenaires de FORTALEZA pour essayer d'approfondir cette question des séries noires dont l'importance dans la programmation d'un grand aménagement hydraulique est indéniable.

Il pleut en moyenne 50 à 80 jours par an. Les précipitations sont en majorité des averses de quelques heures comprenant un (et parfois deux ou trois) corps très intense de 30 à 50 minutes. L'analyse statistique des précipitations sera faite dans le cadre de la monographie, nous donnerons simplement ici une idée des hauteurs de pluies susceptibles d'être recueillies en 24 heures d'après le classement des données d'observations à 5 stations.

	CRATO	BREJO SANTO	MILAGRES	FARIAS BRITO	UMARI
Averse annuelle (mm)	71	68	74	70	63
Averse décennale (mm)	110	111	124	93	89

LE BASSIN DU RIO SALGADO

Les Stations Hydrométriques



Le RIO SALGADO à LAVRAS (en Juin) vu du pont vers l'amont, le barrage est à l'arrière-plan



L'échelle du D.N.O.C.S. au SITIO dos PATOS : repères gravés sur les rochers et cotes peintes sur la pile du pont.



La Vallée du RIO SALGADO à SANTO ANTONIO (en décembre)



Le SALGADO à ICO en Juin

Vue prise du pont vers l'aval et la rive droite

CHAPITRE II

Les DONNEES d'OBSERVATIONS HYDROMETRIQUES

En dépit de quelques arrêts, des lectures d'échelles furent effectuées, bon ou mal an, sous l'égide du DNOCS de 1911 à 1961 tantôt à LAVRAS, tantôt au Sitio dos PATOS. Une autre échelle fut observée à partir de 1957 à ICÓ. Les graduations de 10 en 10 centimètres (ou de 20 en 20 cm) rendent très imprécis les relevés.

A ces stations, situées sur des cours d'eau dont la mobilité des fonds de lits est à craindre, on ne compte que 8 mesures de débits en 50 ans.

Le réseau hydrométrique fut réorganisé sur des bases modernes en 1961. Aux stations principales de LAVRAS et ICÓ furent adjointes 2 stations secondaires à QUIMAMI et SANTO ANTONIO.

Nous citerons simplement pour mémoire les 6 stations installées en 1963 dans le bassin sédimentaire du Haut SALGADO par le G.E.V.J., stations du réseau tertiaire à vocation particulière et de durée vraisemblablement limitée.

Nous allons, par le biais d'une analyse historique, aussi complète que possible, tenter d'obtenir de ces documents anciens le maximum d'informations sur le strict plan des hauteurs d'eau comme sur celui des débits après transformation.

21 - STATION de LAVRAS de MANGABEIRA (8 480 km²) -

Echelle DNOCS n° 1 : installée le 7 Janvier 1911 au droit de la ville.

Echelle numérotée par traits de peinture de 1 à 4 sur des rochers du lit, de 5 à 30 sur un tronç incliné de Carnauba.

Les graduations sont de 20 en 20 centimètres ; le marnage est de 6,00 m.

Lectures quotidiennes en période d'écoulement du 20 Janvier 1911 au 31 Janvier 1916, puis du 24 Décembre 1920 au 30 Avril 1928.

Echelle DNOCS n° 2 : réinstallation en Décembre 1928, au même lieu.

Prolongation de l'échelle ancienne par adjonction de 2 supports en bois scellés au ciment portant les numéros 24 à 32 et 33 à 40 ; le marnage atteint 8,00 m.

Lectures quotidiennes par le même observateur jusqu'au 30 Avril 1930. Ces deux échelles, qui n'en font en fait qu'une seule, ont été rattachées au réseau de nivellement de la voie ferrée par l'ingénieur Plinio Vieira PERDIGÃO en 1928 et 1931. Par rapport à une borne située à la gare de LAVRAS et cotée 240,956 m, le zéro des échelles DNOCS n° 1 et 2 serait à 224,70 m.

Des tronçons de cette échelle subsistant en 1963, on pourrait vérifier ce nivellement et procéder au rattachement avec les échelles SUDENE.

Pour ces deux périodes d'observations 1911-16 et 1920-30, la validité des relevés semble surtout douteuse durant la première période, même en hautes eaux. Sauf en 1911, 1921 et 1922, les lectures cessent lorsque les graduations du Carnaúba sont émergées, soit en-dessous de 1,00 m : le début des écoulements, la période des basses eaux et du tarissement sont donc inconnus.

Echelle SUDENE n° 3 dite échelle-barrage : installée en Décembre 1960 en amont du barrage retenant l'eau pour la ville.

Elle comprend 6 éléments métriques de 2 à 8,00 m à graduation centimétrique.

Echelle SUDENE n° 3 bis dite échelle-pont : installée à la même époque que l'échelle-barrage, environ 150 mètres en aval au droit du pont-routier.

Elle comprend 9 éléments métriques de 2 à 11 mètres à graduation centimétrique.

Un même observateur effectue depuis le 1er Mars 1961 des relevés biquotidiens à 7 h. et 17 h. aux échelles n° 3 et 3 bis ; la fréquence des observations est souvent accrue en période de hautes eaux.

Ces relevés semblent satisfaisants. Nous avons cependant noté que la corrélation qui devrait exister entre les relevés aux 2 échelles n'était étroite qu'en décrue et très lâche en crue et en hautes eaux. Peut-être faut-il voir là une négligence de l'observateur quant au respect des heures de relevés ?

Ces deux échelles sont rattachées en nivellement à des bornes SUDENE placées à proximité, au-dessus des plus hautes eaux.

Etalonnage de l'échelle SUDENE pont :

Il a été entrepris en 1961 par HIDROSERVICE depuis le pont en hautes eaux, à gué en étiage. Les jaugeages ont été réalisés au moulinet ; la mesure des vitesses étant faite sur chaque verticale à 2/10 et 8/10 de profondeur et le calcul du débit mené par la méthode arithmétique.

On compte 133 mesures en 1961 dont 67 furent dépouillées. Parmi elles, 14 jaugeages furent effectués au-dessus de la cote 3,00 m (environ 20 m³/s) dont 4 en hautes eaux entre 4,70 m et 5,40 m (150 à 230 m³/s).

La SUDENE procéda suivant la même méthode à 12 jaugeages (n^{os} 136 à 145) de basses eaux en 1962. Pour sa part, le GEVJ réalisa, en 1962 et 1963, 9 jaugeages complets de basses eaux (exploration totale du champ des vitesses et calcul par double intégration graphique) dont voici la liste :

Date	Cote à l'échelle-pont (en cm)	Débit (en m ³ /s)
7-7-1962	229	0,576
24-7-1962	227	0,134
4-4-1963	309	26,3
18-4-1963	275	12,8
17-5-1963	239	1,95
11-6-1963	231	0,72
18-6-1963	230	0,53
27-6-1963	229	0,60
2-7-1963	230	0,63

En 1961, on distingua 2 courbes de tarage de basses eaux (courbes A et B du graphique n° 1) de part et d'autre du 1er Avril. Les jaugeages de 1962 et 1963 naviguent entre ces 2 courbes, ce qui nous a mené à choisir une courbe unique pour ces 2 années (courbe C), intermédiaire entre les 2 courbes de 1961 entre lesquelles d'ailleurs l'écart relatif des débits n'est supérieur à $\pm 10\%$ qu'en dessous de $5 \text{ m}^3/\text{s}$. La présence du barrage juste en amont de la section de jaugeages doit être favorable à une relative stabilité du lit.

L'étalonnage de 1961 ne permet pas de dépasser la cote 5,50 m. Le maximum atteint en 1963 fut de 8,88 m. Nous avons calculé les débits correspondant à ces cotes élevées :

- a) en extrapolant les courbes de variation des surfaces mouillées et des vitesses moyennes en fonction des cotes,
- b) en appliquant la formule de MANNING $Q = K.S.R^{2/3} I^{1/2}$.

Nous avons admis que la pente du lit était égale à 1 m/km (valeur mesurée en 1928 et 1931) et que le coefficient K calculé pour les jaugeages les plus élevés de 1961 variait régulièrement avec la charge de 15 à 18 pour $H = 4$ à 5 m, jusqu'à 30 pour $H = 9,00$ m (voir graphique n° 1). La conjugaison des 2 procédés d'extrapolation doit apporter une précision de $\pm 10\%$ sur les débits maximaux.

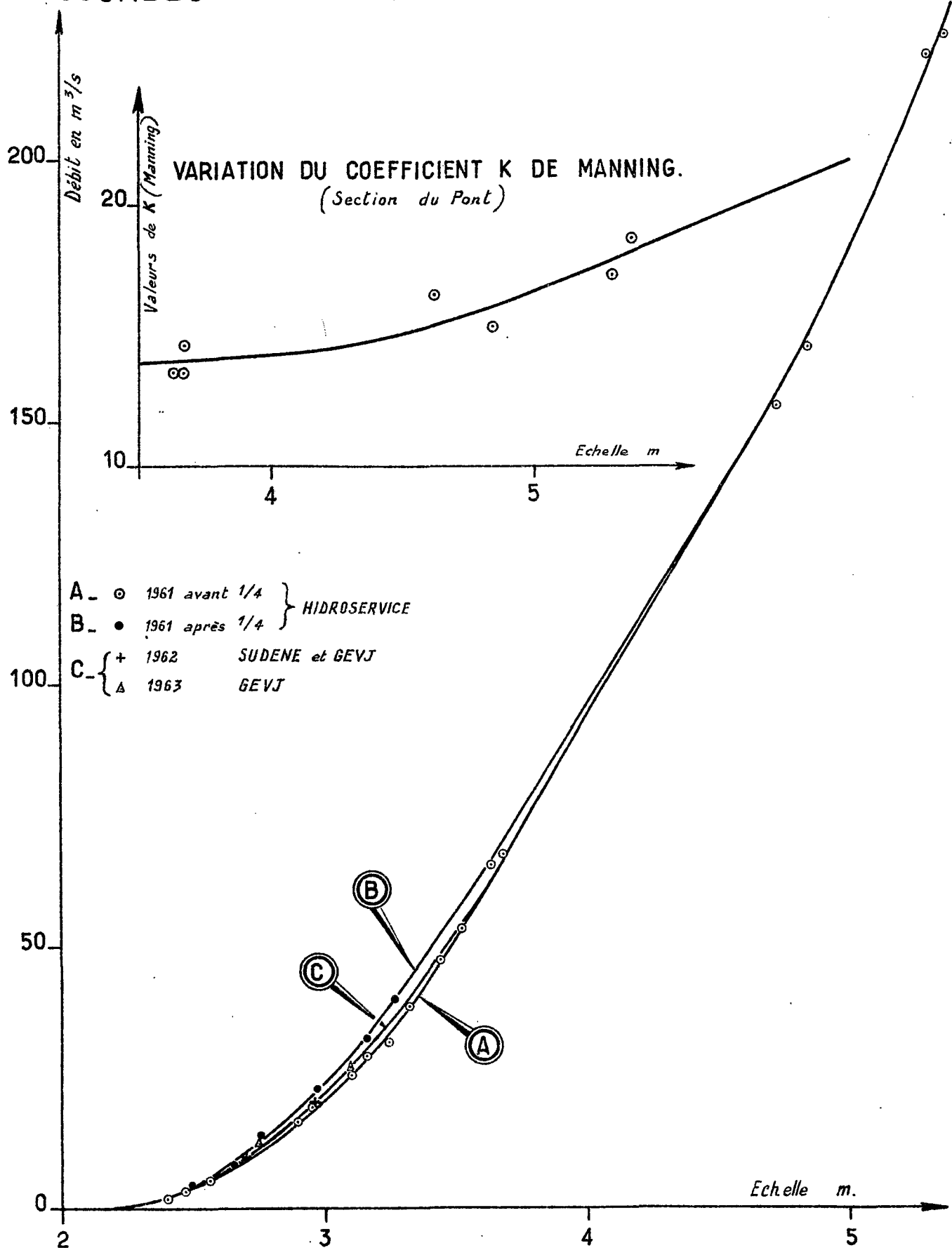
On trouvera dans le tableau n° 6 le barème d'étalonnage adopté. Il a servi à calculer les débits journaliers de 1962 et 1963 ; pour 1961, on a conservé les débits calculés selon l'étalonnage d'HIDROSERVICE.

Etalonnage des échelles DNOCS :

On dispose de 3 jaugeages de très basses eaux effectués en 1931.

Date	Cote à l'échelle (en m)	Débit (en m^3/s)
3-2-1931	0,50	6,78
4-2-1931	1,00	17,24
5-2-1931	0,70	11,7

COURBES D'ÉTALONNAGE - ÉCHELLE-PONT 1961-63



Ces mesures permettent simplement de caler sommairement les échelles DNOCS par rapport aux échelles SUDENE. L'estimation des débits ne peut se faire qu'en appliquant la formule de MANNING avec une pente de 1 m/km et un coefficient K variant selon la charge, comme en 1961-63, c'est-à-dire de 20 à 30 pour des cotes anciennes de 4 à 7 mètres. Bien que les relevés fassent état de maximums observés de 7,60 m, les nivellements de 1928 et 1931 de l'ingénieur P.V. PERDIGAO attestent que la cote maximale de 1924 fut de 7,00 m. Nous adopterons ce chiffre comme étant le plus vraisemblable.

Les profils en travers, effectués en 1928 et 1931, permettent de tracer la courbe de variation de la section mouillée en fonction de la cote à l'échelle.

On trouvera dans le tableau n° 6, le barème d'étalonnage calculé pour traduire les relevés des périodes 1911-16 et 1920-30. Il ne faut pas attendre une précision supérieure à $\pm 20 \%$ sur la connaissance des débits à l'aide de ce barème.

En outre, le barrage de LAVRAS étant vraisemblablement postérieur à 1930, on doit supposer que le lit était antérieurement assez mobile et que le barème établi ne peut être qu'une moyenne des étalonnages réels, ou plus exactement, qu'il ne peut s'appliquer qu'à certaines années. Nous verrons comment lever cette hypothèse lors de l'étude des débits.

22 - STATION du STIPIO dos PATOS (9 305 km²) -

Pour relayer l'échelle de LAVRAS, inobservée depuis 6 ans, le DNOCS installa en Octobre 1936 une échelle au droit du pont par lequel l'embranchement ferroviaire de la ligne vers le PARAIBA franchit le rio SALGADO. Cette échelle subsiste de nos jours. Elle se compose de numéros espacés de 10 en 10 centimètres, gravés ou peints :

- a) de 2 à 19 sur les affleurements rocheux du fond du lit -
- b) de 20 à 77 sur la pile centrale du pont.

Le marnage est donc de 7,50 m.

TABLEAU N° 6

BAREMES d'ETALONNAGES CALCULES à LAVRAS et PATOS

Lecture d'échelle en centimètres	Débits calculés en m ³ /s		
	LAVRAS-PONT Echelle SUDENE n° 3 bis (années 1962-63 courbe C)	LAVRAS-DNOCS Echelles n° 1 et 2	PATOS-DNOCS
0		0,50	0
20		1,00	0,10
40		5	0,30
60		9	0,80
80		13	1,80
100		17	5
120		28	8,5
140		39	15
160		51	25
180		63	35
200		75	45
220	225 cm : Q = 0	95	61
240	2,30	115	77
260	6,7	135	93
280	13,8	155	109
300	22,5	175	125
320	32	201	145
340	45	227	165
360	60	256	188
380	76	288	214
400	94	320	240
420	111	360	280
440	128	400	320
460	145	442	364
480	162	486	412
500	181	530	460
520	204	594	524
540	230	658	588
560	260	737	656
580	290	831	728
600	330	925	800
620	370	1 027	876
640	415	1 129	952
660	460	1 232	1 028
680	505	1 336	1 104
700	550	1 440	1 180
750	690		1 370
800	850		
850	1 025		
900	1 220		

En 1936 et en 1938, P.V. PERDIGÃO effectua plusieurs nivellements de profils en travers et une mesure de profil en long jusqu'à LAVRAS ; l'échelle fut alors rattachée à une borne du nivellement ferroviaire sise en rive gauche du pont et cotée 225,139 m. Le zéro de l'échelle dans ce système est de 216,42 m.

L'échelle de PATOS a été lue régulièrement matin et soir depuis le 2 Février 1957 jusqu'au 31 Mai 1961 sans interruption.

Les relevés de cette échelle sont entachés d'une imprécision notable, bien qu'inférieure à celle qui affecte les échelles DNOCS de LAVRAS, l'espacement des graduations y étant de 10 et non plus de 20 cm.

Mais leur validité s'améliore bien car le lecteur ne cesse ses observations que pour des cotes assez basses, souvent inférieures à 0,80 m ; si l'assèchement du lit ne peut-être précisé, la connaissance des basses eaux et du tarissement est assez bonne.

Etalonnage :

Le DNOCS procéda à 3 jaugeages d'étiage au moulinet à coupelles PRICE en 1938.

Date	Cote en cm	Débit en m ³ /s
2-2-1938	70	1,16
3-2-1938	80	1,77
4-2-1938	120	8,41

Comme pour les relevés des échelles DNOCS de LAVRAS, l'estimation des débits ne peut être faite qu'en appliquant la formule de MANNING.

La pente du lit mesurée en 1936 et 1938 est de 0,60 m/km.

La variation de la section mouillée en fonction de la cote est déduite des profils en travers effectués les mêmes années.

La difficulté réside dans le choix du coefficient K. Par analogie de structure morphologique du lit avec la station de LAVRAS, on adoptera des valeurs voisines et cependant légèrement supérieures pour les hautes eaux car les parois lisses des culées du pont favorisent l'écoulement canalisé, sans débordement : de 20 à 35 pour des charges croissant de 2 à 7 mètres.

Les débits ainsi calculés, et dont la précision n'excède pas $\pm 20\%$, permettent l'établissement d'un barème que l'on trouvera aussi dans le tableau n° 6.

Comme à LAVRAS, le lit est certainement un peu instable et le barème ainsi établi ne doit réellement s'appliquer qu'à certaines années.

23 - STATION d'ICÓ (11 920 km²) -

Echelle DNOCS n° 1 :

Elle fut installée en Janvier 1957, en rive droite du fleuve à l'entrée de la ville en venant d'IGUATU. Sa graduation va de 10 en 10 centimètres. Des relevés réguliers y ont été effectués matin et soir depuis le 1er Février 1957 et jusqu'en fin Mai 1962.

Echelle SUDENE n° 2 :

Elle fut mise en place au même endroit que la précédente, juste en amont du pont-routier, en Décembre 1960. Elle comprend 6 éléments métriques de 2 à 8 mètres, à graduations centimétriques. Elle est rattachée à 2 bornes de nivellement sises à proximité, au-dessus des plus hautes eaux. Depuis le 13 Février 1961, on y effectue des relevés réguliers à 7 h. et 17 h. et plus fréquemment en période de hautes eaux.

Les relevés effectués à l'échelle DNOCS peuvent être transformés en relevés par rapport à l'échelle SUDENE si on leur ajoute 178 cm.

Etalonnage de la station :

Comme à LAVRAS et selon le même procédé, HIDROSERVICE réalisa 103 mesures de débits en 1961, la plupart en très basses eaux : 78 d'entre elles ont été calculées dont 11 pour des cotes dépassant 3,00 m (50 m³/s environ) et atteignant au maximum 5,40 m (545 m³/s).

La SUDENE réalisa 23 jaugeages de basses eaux (n° 104 à 126) en 1962.

Pour sa part, le GEVJ a fait 18 jaugeages complets de basses eaux en 1962 et 1963, dont la liste suit.

Il faut mentionner en outre 2 mesures du DNOCS en 1957 :

13-4-1957	1,30	DNOCS	ou	3,08	SUDENE	34,4 m ³ /s
13-4-1957	1,40	"	ou	3,18	"	41,3 "

ICO - ECHELLE SUDENE

LISTE des JAUGEAGES GEVJ

Date	Cote en mètres	Débit en m ³ /s
8-7-1962	2,075	0,472
19-8-1962	2,00	0,0048
19-4-1963	3,01	42
30-4-1963	2,68	13,7
4-5-1963	2,60	9,45
4-5-1963	2,59	8,70
9-5-1963	2,55	8,00
10-5-1963	2,58	8,63
11-5-1963	2,55	7,45
27-5-1963	2,37	2,08
28-5-1963	2,36	1,90
29-5-1963	2,35	1,65
3-6-1963	2,32	1,43
10-6-1963	2,30	1,18
17-6-1963	2,28	0,99
19-6-1963	2,27	0,75
25-6-1963	2,26	0,62
27-6-1963	2,28	0,84

Comme on pouvait s'y attendre pour une station au lit démesurément large dans lequel le chenal de basses eaux divague au milieu des sables, on constate depuis 1961 une extrême instabilité de la relation hauteurs-débits.

Le nombre de jaugeages est suffisant pour tracer les courbes applicables à chaque année (graphique n° 2) ; après un léger creusement dû à la crue modérée de 1962, on assiste à un important remblaiement provoqué par la très forte crue de 1963 de telle sorte qu'entre ces 2 dernières années, les débits peuvent varier du simple au double, en dessous de 80 m³/s pour une même lecture d'échelle.

A ICÔ, des mesures de basses eaux sont nécessaires chaque année pour établir la relation hauteurs-débits.

Nous ne disposons, pour la période 1957-60, que de 2 mesures effectuées avant la crue d'Avril 1957 ; elles permettent le tracé d'une relation hauteurs-débits applicable au début de l'année. Pour le reste de la période, nous avons pu estimer l'étalonnage, sans jaugeages, par un examen détaillé des courbes de tarissement en hauteurs, les lectures ayant été poursuivies fort heureusement presque jusqu'à l'assèchement complet. Par comparaison avec les années 1961, 1962 et 1963 connues, on a pu voir que 1957, 1958, 1959 et 1960 s'apparentaient étroitement à 1963, ce qui a permis de leur appliquer le barème de cette année-là.

En résumé, les relations hauteurs-débits de basses et moyennes eaux ont été appliquées comme suit :

1er Février-19 Avril 1957	Barème 1957	(jaugeages DNOCS) - Courbe A
20 Avril 1957 à fin 1960 et 1963	Barème 1963	(jaugeages SUDENE et GEVJ) - Courbe D
1961	Barème 1961	(jaugeages HIDROSERVICE) - Courbe B
1962	Barème 1962	(jaugeages SUDENE et GEVJ) - Courbe C

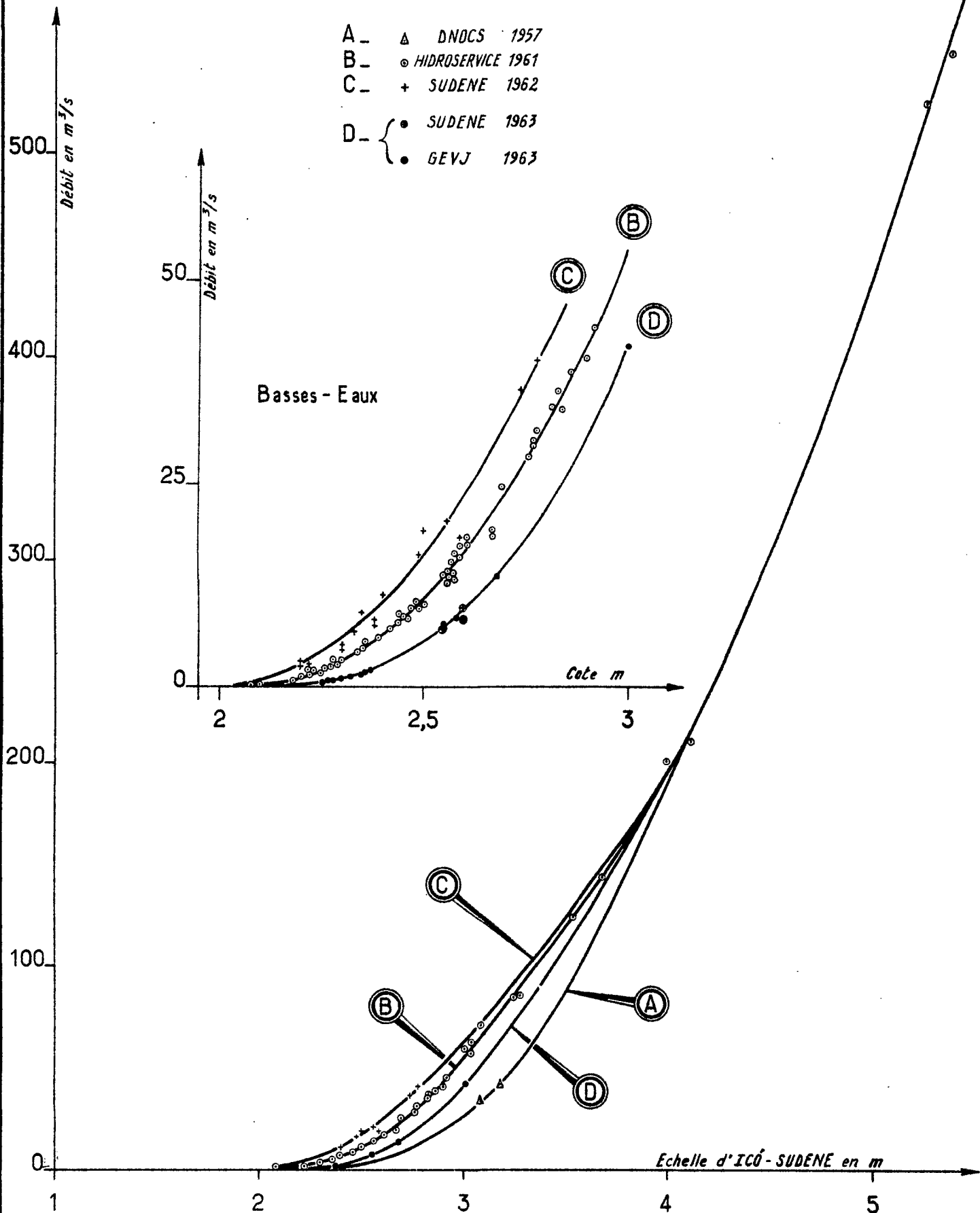
Toutes ces courbes concourent pour une cote voisine de 4,00 m (200 m³/s) au-dessus de laquelle ne subsiste qu'une courbe unique d'étalonnage des hautes eaux pour toute la période d'observations, ce qui est tout à fait compatible avec ce que l'on connaît du modelé des lits et de la mise en mouvements des alluvions grossières.

SALGADO à ICÓ - SUDENE -

Gr. 2.

COURBES D'ÉTALONNAGE

- A - Δ DNOCS 1957
- B - \circ HIDROSERVICE 1961
- C - + SUDENE 1962
- D - \bullet SUDENE 1963
- GEVJ 1963



ETR_291.188

J. Métyer - le 26-2-64

Les jaugeages les plus élevés ne permettent un tracé de la courbe d'étalonnage que jusqu'à 6,00 m environ. La crue de 1963 atteignit 7,35 m. La détermination de ces débits de très hautes eaux a été effectuée de 2 manières :

- a) en extrapolant les courbes de section mouillée et de vitesse moyenne -
- b) en appliquant la formule de MANNING pour laquelle on retiendra une pente supposée égale à 0,40 m/km (on avait 0,60 m/km à PATOS) et un coefficient K qui, déduit des jaugeages de hautes eaux, a été estimé à 30. Les deux extrapolations sont concordantes et conduisent au barème suivant, valable à $\pm 10\%$ semble-t-il :

Cote (m)	Débit (m ³ /s)
6,00	760
6,20	840
6,40	930
6,60	1 030
6,80	1 130
7,00	1 240
7,20	1 350
7,40	1 470

24 - STATION de SANTO ANTONIO (10 530 km²) -

Intermédiaire entre PATOS et ICÓ, cette station a été installée en Décembre 1960 à 16 km en amont d'ICÓ. L'échelle comprend 6 éléments métriques de 1 à 7 m, gradués de centimètre en centimètre. Deux repères de niveau ont été placés au-dessus des plus hautes eaux, en rive droite.

Des observations y sont effectuées régulièrement depuis le 9 Février 1961, au moins 2 fois par jour.

Le site est rocheux et le lit assez étroit ne doit pas faire l'objet de débordements en crue ; on y a installé une nacelle suspendue à un câble pour les jaugeages de hautes eaux.

On n'ya cependant fait que des jaugeages de basses et moyennes eaux jusqu'ici :

- a) HIDROSERVICE, une centaine en 1961 dont 40 seulement furent calculés ; aucun ne dépasse la cote 2,50 m, soit environ 20 m³/s -
- b) la SUDENE, onze (n° 101 à 111) en 1962 dont le plus élevé atteint 3,26 m, soit 63 m³/s -
- c) le GEVJ, deux complets en 1963 :

18-6-63	1,87 m	0,55 m ³ /s
27-6-63	1,84 m	0,64 m ³ /s

Toutes ces mesures figurent sur le graphique n° 3 où la stabilité du fond du lit, favorisée par les affleurements rocheux, semble vraisemblable, tout au moins pour ces 3 années. On en a déduit un barème applicable jusqu'à la cote 3,50 m (88 m³/s). La connaissance d'un profil en travers complet et de la pente aurait permis d'extrapoler la courbe vers les hautes eaux ; l'intérêt de ce travail a paru secondaire au stade de cette étude.

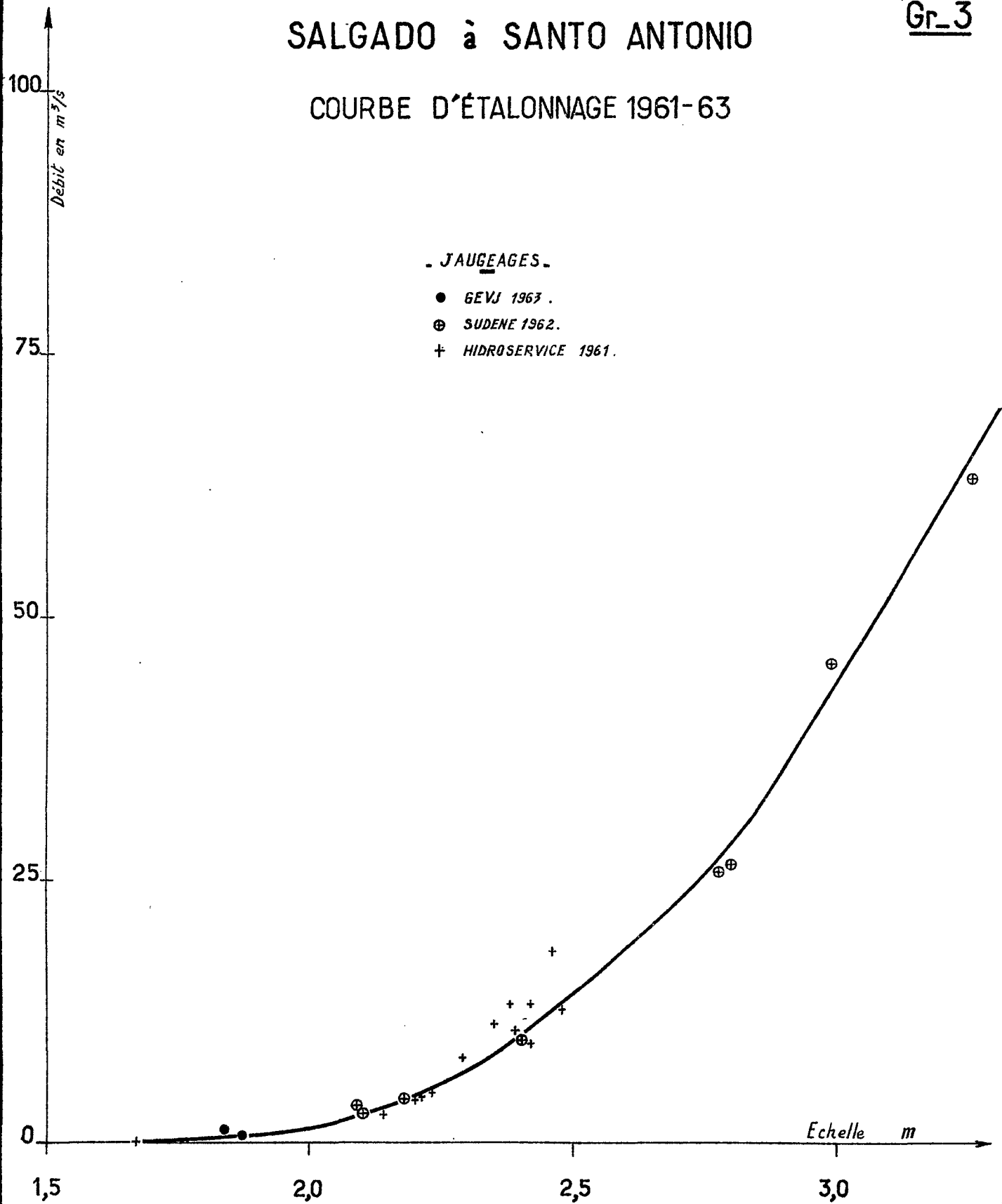
25 - STATION de QUIMAMI sur le HAUT SALGADO ou RIO CARAS (1 853 km²) -

Elle a été installée en Septembre 1962 par la SUDENE, au droit du pont de la voie ferrée, en amont du confluent du rio CARAS avec le rio dos PORCOS, au lieu dit "Olho d'agua do BURACO".

Cette échelle à graduation centimétrique est lue, depuis le 25 Novembre 1962, au moins 2 fois par jour.

SALGADO à SANTO ANTONIO

COURBE D'ÉTALONNAGE 1961-63



Des jaugeages de basses eaux (8 au total) effectués en 1962 et 1963 ont mis en évidence l'instabilité du lit. Inaccessible en saison des pluies, cette station a été doublée par celle de Sitio LAPINHA installée le 8 Avril 1963 quelques kilomètres en amont par le GEVJ.

L'étude hydrologique du CARIRI, entreprise par le GEVJ, fournit toutes les indications sur ces 2 stations d'intérêt secondaire pour notre travail ; en voici les conclusions, extraites du rapport sur la campagne 1963 :

- a) corrélation linéaire correcte entre les 2 échelles,
- b) étalonnage des basses et moyennes eaux réalisé par 21 jaugeages complets,
- c) traduction des hauteurs en débits pour toute la période d'observations, sauf pour les très hautes eaux, supérieures à 5,00 m à QUITMAMI (environ 40 m³/s), soit 18 jours en 1963 au total.

C H A P I T R E III

Les ECOULEMENTS MENSUELS et ANNUELS

L'étude du régime du rio SALGADO sera effectuée pour la station d'ICÓ d'une part, et pour celles de LAVRAS et PATOS d'autre part ; ces deux dernières stations n'en faisant qu'une, au niveau de cette étude, puisque l'accroissement de superficie drainée à PATOS représente seulement 9,7 % de la surface du bassin à LAVRAS ; la variation de régime résultante ne peut être que très faible.

31 - DETERMINATION des DEBITS - Les TARISSEMENTS -

L'emploi des divers barèmes d'étalonnage établis au chapitre II ne peut suffire à la détermination complète des débits. Il faut en effet se rappeler que, pour les stations anciennes du DNOCS, les tarissements sont peu ou pas du tout observés. En outre, parmi les relevés récents, on enregistre les lacunes d'observations suivantes :

- Avril 1963 à ICÓ
- Janvier-Février 1961, Mai 1962 et du 21 Mars au 2 Avril 1963 à LAVRAS.

Les débits de Mars-Avril 1963 à LAVRAS ont été calculés sans difficulté après reconstitution des lectures d'échelle par corrélation avec l'échelle du barrage car il s'agissait d'une période de décrue pendant laquelle cette corrélation est étroite.

Les débits moyens des 4 autres mois manquants ont été estimés par corrélation entre les 3 stations de LAVRAS, ICÓ et SANTO ANTONIO, bien que les relations entre débits moyens mensuels ne soient pas très serrées, comme on pouvait s'y attendre avec un régime torrentiel entre stations drainant des bassins d'aires assez différentes (l'accroissement est de 40 % de LAVRAS à ICÓ).

Ce procédé, seul applicable pour combler les lacunes de ces mois de basses et moyennes eaux, ne peut pas entraîner de grave erreur sur l'estimation des modules annuels, but recherché en l'occurrence.

La reconstitution des débits de basses eaux pour les années anciennes correspondant à des lectures aux échelles DNOCS exige la connaissance des lois de tarissement aux stations considérées : ICÓ, PATOS et LAVRAS.

Ces lois ont pu être mises en évidence grâce aux relevés de la période 1961-63 dont la précision, accrue par des nombreux jaugeages de basses eaux, est excellente.

Tant à ICÓ qu'à LAVRAS, on constate que les tarissements suivent une loi exponentielle de la forme $Q = Q_0 e^{-at}$ à peu près constante d'une année sur l'autre et qu'à partir d'un certain débit (très faible), il y a une accélération de ce tarissement qui conduit en quelques jours à la disparition de l'écoulement superficiel.

Cet accroissement de la vitesse de tarissement correspond à la phase d'épuisement de l'écoulement superficiel et apparaît quand le débit disponible n'est plus nettement supérieur aux besoins propres de la consommation du lit (mouillage des sables et évaporation).

Pour les cours d'eau de régions sèches et chaudes, dont les lits sont très grands, l'arrêt de l'écoulement superficiel doit certainement toujours suivre ce processus.

Lois de tarissement (1961-63)

	LAVRAS	ICÓ
<u>Tarissement normal</u>		
Débit charnière	1 m ³ /s	10 m ³ /s
Durée	30 jours	40 jours
Coefficient a	0,046	0,058
<u>Tarissement accéléré</u>		
Débit charnière	0,25 m ³ /s	1 m ³ /s
Durée	30-40 jours	50-55 jours
Coefficient a	0,084	0,074

L'application de ces lois permet le calcul des débits de basses eaux pour les périodes sans relevés d'échelles (le lecteur indique "rio seco" quand la dernière graduation de l'échelle est hors d'eau, alors que l'écoulement n'est pas tari) des années 1957-60 à ICÓ et 1911-15, 1921-29 à LAVRAS.

Si le choix d'une loi moyenne unique du tarissement se justifie pour ICÓ, il n'en est pas de même à LAVRAS, comme nous allons le voir. A cette station, en outre, dans les premières années le lecteur arrête ses lectures avant même que le tarissement ne commence. Pour combler ces vides, nous avons établi, à l'aide des relevés de 1961-63, une courbe moyenne exponentielle de décrue :

- a) rapide de 50 à 6 m³/s en 6 jours -
- b) lente de 6 à 1 m³/s en 10 jours.

Cette allure de décrue moyenne correspond à la vidange du lit avant le tarissement.

A PATOS, nous n'avons pas de relevés centimétriques récents et précis pour établir une loi de tarissement. Heureusement, les relevés sont assez corrects et descendent assez bas, toujours en dessous du débit charnière d'apparition du tarissement. Nous avons donc analysé tous ces tronçons de courbes de tarissement. Bien que les débits choisis issus du barème d'étalonnage calculé ne puissent pas s'appliquer à toutes les années, la variation relative des débits paraît devoir rester significative. On constate une accélération du tarissement sur la période d'observations 1936-61, en 2 phases distinctes commençant en 1945 et 1951. Dans chaque période, les courbes de tarissement sont très voisines :

Période	Valeurs extrêmes de a	Valeur moyenne de a
1937-45	0,039-0,052	0,045
1946-50	0,059-0,066	0,060
1951-61	0,085-0,120	0,100

Ainsi, la durée de tarissement entre $1 \text{ m}^3/\text{s}$ (valeur proche du débit charnière) et 100 l/s passerait de 50 jours à 33 jours puis à 23 jours. Bien qu'il faille être prudent dans l'interprétation de ces chiffres qui paraissent exagérés en regard des résultats d'ICO et de LAVRAS, la seule explication de cette accélération du tarissement nous semble devoir être recherchée du côté de la politique des retenues superficielles dont le nombre et la capacité totale d'accumulation vont croissants. Un bilan complet des retenues et de leur date de construction permettrait de vérifier cette hypothèse. Notons qu'en 1945, année-clé de l'accélération du tarissement, on enregistre un écoulement pérenne, incompatible avec l'absence de pluies, vraisemblablement dû à des lâchures artificielles durant la construction d'un ou plusieurs barrages.

Les débits de basses eaux à PATOS ont été estimés en utilisant la courbe de tarissement moyenne de chaque période et une courbe d'épuisement analogue à celle de LAVRAS.

Il est certain que, si ces variations de la loi de tarissement de PATOS sont valables, on peut craindre pour LAVRAS que l'application d'une loi unique établie en 1961-63 ne soit trop sévère pour des étiages de la période 1911-30.

Les débits ainsi calculés ou reconstitués ne peuvent pas être précis. Mais comme les corrections portent sur les faibles débits, nous pensons que la précision sur la connaissance des modules reste satisfaisante ; on ne peut pas en dire autant en ce qui concerne les débits moyens mensuels des mois de Mai à Septembre.

En définitive, les données disponibles pour une analyse du régime hydrologique sont les suivantes :

ICÓ	1957 à 1963	soit 7 ans
LAVRAS	1911 à 1915 1921 à 1929 1961 à 1963	soit 17 ans
PATOS	1937 à 1961	soit 25 ans.

Les débits mensuels ont été calculés pour ces périodes. Quant aux modules, on les a évalués pour l'année hydrologique commençant le 1er Octobre.

Ces données ne seront présentées qu'après l'étude de corrélation hydropluviométrique qui doit permettre de vérifier la validité des étalonnages adoptés.

32 - Les MODULES ANNUELS - CORRELATIONS HYDROPLUVIOMETRIQUES -

L'étude des modules annuels ne peut être effectuée sur les seuls échantillons tirés des observations : 7 ans à ICO, 17 ans à LAVRAS et 25 ans à PATOS. Certes, on peut grouper ces 2 dernières stations en une seule et considérer que l'on dispose d'une série de 42 ans à LAVRAS ; en transformant les modules en lames d'eau, on fait disparaître l'influence de la superficie drainée et les stations de LAVRAS et PATOS peuvent être confondues. Cependant, on ne peut attribuer une forte confiance à cette série de LAVRAS, si ce n'est aux 3 dernières années 1961-63.

Dans ces conditions, la mise en évidence d'une corrélation entre les lames d'eau écoulées L et la hauteur annuelle de précipitation P permettrait une analyse critique donc une valorisation des séries observées et une extension à 50 ans environ, la pluviométrie étant assez bien connue depuis 1913.

Choix d'une hauteur annuelle de précipitation indicielle P_i :

La densité du réseau pluviométrique ne permet le calcul de la hauteur annuelle vraie de précipitation, par tracé des isohyètes, que pour les années postérieures à 1957. Le choix d'une hauteur indicielle s'imposait. On a utilisé, pour sa détermination, les 5 stations de base suivantes : CRATO, BREJO SANTO, AURORA, VARZEA ALEGRE et UMARI.

Les coefficients de pondération à affecter à chacune de ces stations ont été estimés par rapport à leurs aires d'influence, puis modifiés pour tenir compte de la répartition des hauteurs de précipitations sur le bassin en fonction du relief, de telle sorte que soit minimisé l'écart entre la hauteur indicielle P_i et la hauteur vraie P. Pour le bassin du SALGADO à ICO, le meilleur résultat a été obtenu avec la formule suivante, dans laquelle figurent les hauteurs annuelles de précipitation aux 5 stations de base désignées par l'initiale de leur nom :

$$P_i = 0,18 C + 0,23 BS + 0,22 A + 0,14 VA + 0,23 U$$

Pour les 7 années de 1957 à 1963, le coefficient de corrélation entre P_i et la hauteur vraie P est de 0,98.

On constate, pour la période considérée, que les hauteurs vraies de précipitation annuelle sur les bassins limités à LAVRAS et à ICO sont très étroitement liées :

$$P_{Lavras} = 1,02 P_{ICO} \quad (r = 0,99),$$

de telle sorte qu'il s'est avéré inutile de rechercher une nouvelle formule pour la hauteur indicielle à affecter au bassin de LAVRAS, celle du bassin d'ICO P_i y étant applicable et représentative à une constante près, voisine de l'unité, de la vraie hauteur P.

La hauteur indicielle P_i a été calculée pour toutes les années de la période 1913-63 en considérant un cycle pluviométrique en avance d'un mois sur l'année hydrologique, soit du 1er Septembre au 31 Août, pour tenir compte des quelques pluies précoces survenant parfois en Septembre (voir tableau n° 7).

Corrélation lame écoulee L-hauteur indicielle P_i :

Les graphiques n° 4 et 5 montrent ces essais de corrélation pour ICÓ et LAVRAS-PATOS.

Pour ICÓ, la dispersion des 7 points est déjà notable. Quant à LAVRAS-PATOS, les 42 valeurs forment un nuage de points très dispersé dans lequel apparaissent des groupements d'années manifestant des tendances propres, ce qui ne peut être dû qu'aux variations d'étalonnage de la station.

S'il existe une corrélation entre lames écoulées et hauteurs indicielles de précipitation, elle est très lâche, mais cette dispersion ne doit pas surprendre. Pour des rivières drainant des bassins de quelques milliers de km^2 , en grande partie imperméables, à couvert végétal réduit et dotés de pentes non négligeables, la hauteur annuelle de précipitation n'est que l'un des facteurs - le principal certes - conditionnels de l'écoulement.

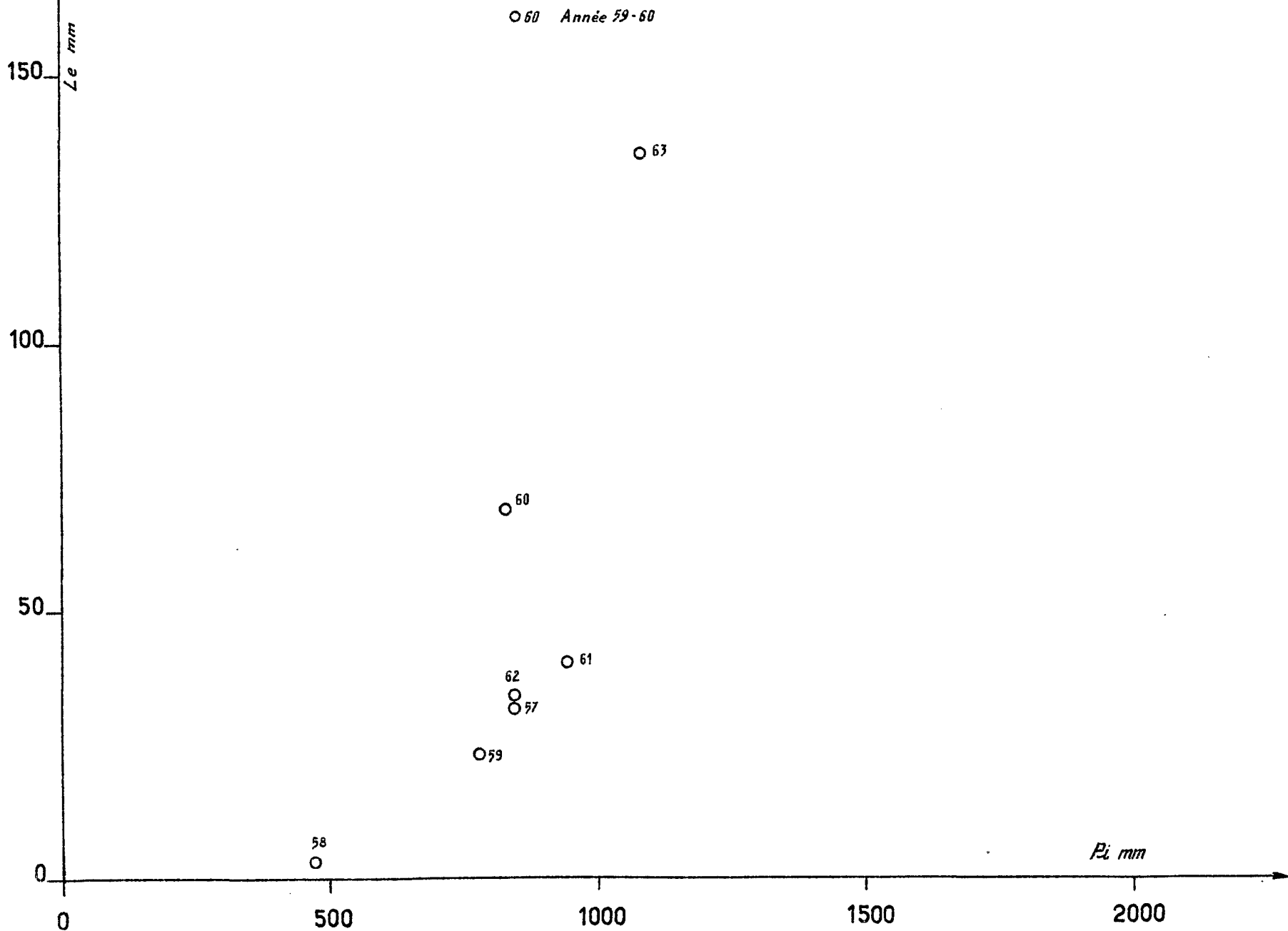
La sévérité du régime tropical, à tendance semi-aride certaines années, accroît la dispersion et doit conduire à envisager une relation lame écoulee-précipitations sous une forme non linéaire, peut-être parabolique.

Recherche d'un indice pluviométrique représentatif de l'écoulement :

L'amélioration de la corrélation hydropluviométrique précédente peut se faire en y introduisant des facteurs secondaires correctifs. On voit rapidement qu'ils peuvent être classés en 2 groupes représentant l'un la répartition des précipitations dans l'année, leur importance et leur concentration, l'autre la différence de potentialité d'écoulement des zones sédimentaires et cristallines.

CORRÉLATION LAMES ÉCOULÉES - PLUIES INDICIELLES A ICÓ

Gr. 4



ORSTOM

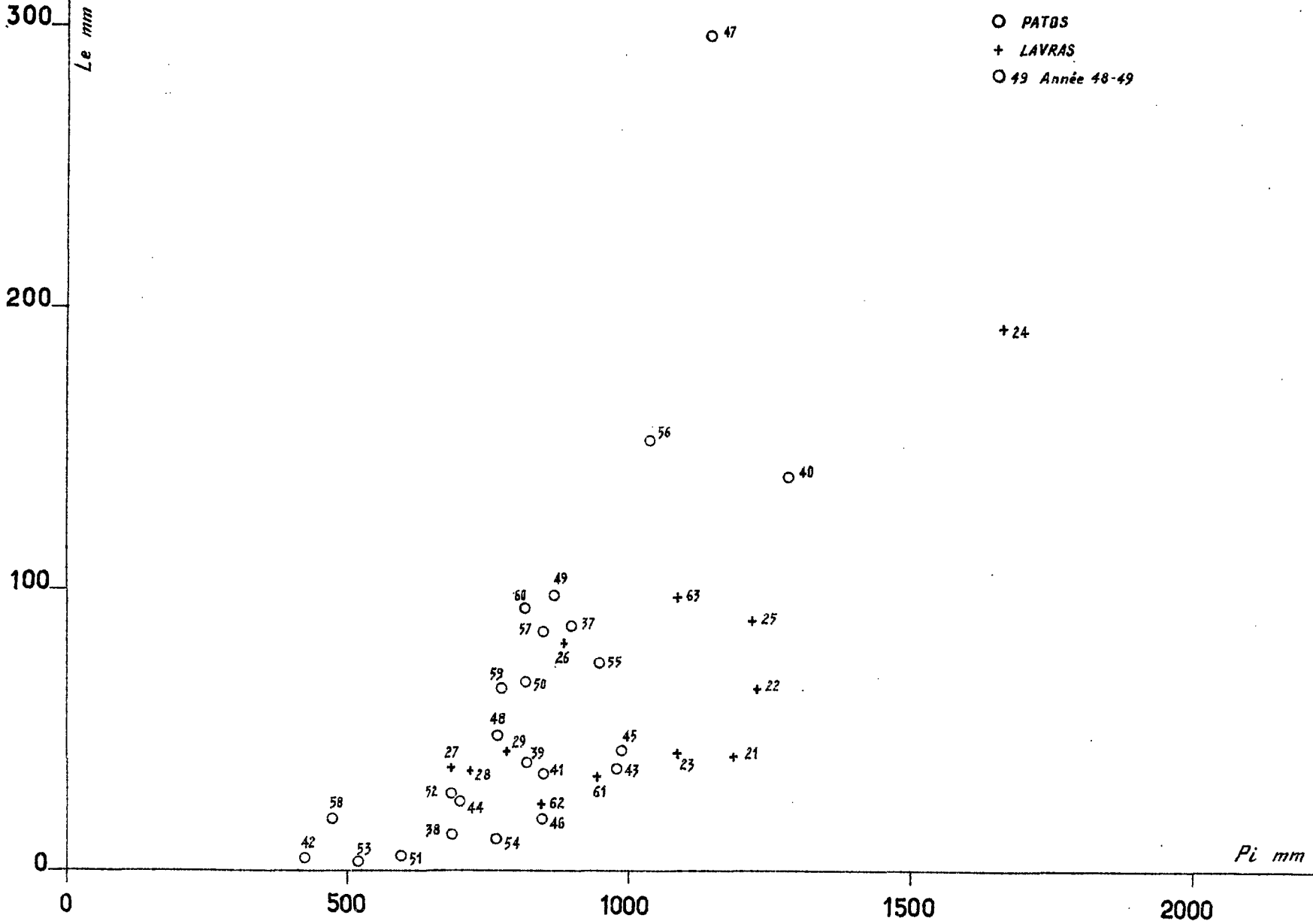
Ao

DATE: 5-3-64

DESSINÉ: J. Métyer

FTR_291.190

CORRÉLATION LAMES ÉCOULÉES - PLUIES INDICIELLES A LAVRAS-PATOS



CRS T O M

Ao

DATE: 5-3-64

DESSINÉ: J. Mélaye

ETR_291.191

L'examen des relevés hydrométriques montre que l'écoulement n'apparaît que lorsqu'une certaine quantité de pluies est tombée, de 50 à 100 mm en un mois environ d'une part et, d'autre part, que toutes les précipitations, dont les hauteurs mensuelles sont inférieures à un seuil comparable, ne participent pas à la formation de l'écoulement mais sont entièrement consommées par évapotranspiration. Par contre, la concentration relative des pluies au cours du trimestre le plus arrosé Février-Avril ne semble pas être un facteur influant sur la quantité totale d'eau écoulée.

En ce qui concerne le rôle joué par la zone sédimentaire dans la formation de l'écoulement, d'utiles renseignements ont été extraits de l'étude entreprise en 1963 dans le CARIRI. On a pu ainsi calculer l'écoulement de l'année 1962-63 pour le haut SALGADO (en additionnant les apports à QUIMAMI et MILAGRES soit à l'issue de 5 387 km² de bassin dont plus de, 75 % repose sur des terrains sédimentaires), puis pour LAVRAS et pour ICO en y faisant apparaître, par soustraction des apports du haut-SALGADO, la participation propre des bassins intermédiaires (en aval de QUIMAMI) reposant entièrement sur les terrains cristallins.

	:Haut SALGADO:	LAVRAS :	ICO :
: Bassins versants en km ²	: 5 387 :	: 8 480 :	: 11 920 :
: Rapport des surfaces en %	: :	: 63,3 % :	: 45 % :
: Volume écoulé en 10 ⁶ m ³	: 277 :	: 835 :	: 1 615 :
: Rapport des volumes en %	: :	: 33,2 % :	: 17,1 % :
: Volume écoulé par km ² en 10 ³ m ³	: 51 :	: 180 (1) :	: 205 (1) :

(1) pour les zones cristallines des bassins intermédiaires.

Ainsi la potentialité des terrains sédimentaires apparaît-elle 4 fois moindre de celle des terrains cristallins ; il faudrait même prendre un rapport de 1 à 5 si l'on tenait compte du fait que le haut SALGADO considéré draine 25 % de terrains cristallins et reçoit une hauteur annuelle de précipitation supérieure de 10 à 20 % à celle des bassins intermédiaires cristallins.

La représentation de cette potentialité réduite des terrains sédimentaires par un facteur chiffré, pouvant entrer comme 2ème correctif de la corrélation hydropluviométrique après un facteur de répartition utile des précipitations dans l'année et permettant d'appliquer la méthode des déviations résiduelles, s'est avérée difficile et peu fructueuse.

Nous avons préféré établir un indice pluviométrique représentatif de l'écoulement sur les bases suivantes :

- a) considérer la seule pluie utile c'est-à-dire celle qui dépasse mensuellement un certain seuil pris égal à 50 mm -
- b) tenir compte de la potentialité réduite de la zone sédimentaire en élevant le seuil d'efficacité pour les pluviomètres de cette zone.

La forme de l'indice et les coefficients ont été ajustés sur la corrélation d'ICÓ qui, bien qu'établie sur 7 points seulement, était, du point de vue des étalonnages, la plus digne de confiance. Le même indice, légèrement modifié pour tenir compte de la part relative plus grande de la zone sédimentaire, a ensuite été ajusté sur la série de LAVRAS-PATOS.

Corrélation lame écoulée L_e -indice pluviométrique I_p :

A - ICÓ -

Elle est représentée sur le graphique n° 6. On y constate l'excellence de la liaison entre la lame écoulée L_e et l'indice pluviométrique d'écoulement I_{pI} qui répond à la formule suivante, exprimée en millimètres :

$$I_{pI} = 0,9 \left[\sum(A_m-50) + \sum(U_m-50) \right] + 1,2 \sum(VA_m-50) + \sum(C_m-250) + \sum(BS_m-250)$$

dans laquelle A_m , U_m , VA_m , C_m et BS_m sont les hauteurs mensuelles de précipitations aux 5 stations de base déjà citées et désignées par leur initiale, et où les expressions de la forme $\sum(A_m-50)$ sont les sommes des excédents pluviométriques mensuels positifs à 50 mm pour les stations de la zone cristalline (ou à 250 mm pour celles de la zone sédimentaire).

Nous nous contenterons de l'ajustement graphique sans chercher si la corrélation peut s'exprimer d'une manière analytique simple, ce qui ne présente guère d'intérêt, celle-ci devant être du type $L_e = a(|P_I - I_0|)^n$ avec n supérieur à 2 semble-t-il.

On trouvera dans le tableau n° 7 les valeurs observées de 1957 à 1963 des lames écoulées à ICÓ, les valeurs déduites de la corrélation pour la période complète 1913-63 et celles de l'indice P_I .

On vérifie la justesse de cette corrélation en comparant lames observées et calculées pour la période 1957-63 (graphique 7) : le coefficient de corrélation égal à 0,992 est excellent. On peut donc admettre que la série des 43 nouvelles lames d'eau obtenues par le calcul n'a, du fait de la méthode de détermination, pas dû subir un laminage marqué de sa dispersion. En effet, les écarts entre lames observées et calculées restent inférieurs à ± 2 mm dans 98 % des cas, ce qui rend inutile toute correction des valeurs calculées.

L'irrégularité interannuelle du régime du SALGADO est très grande et seule une longue série de lames écoulées peut donner une idée des caractéristiques de ce régime ; on en jugera aux écarts importants sur l'estimation de la moyenne et de l'écart-type qui existent entre les séries de 7 ans et de 50 ans :

-- Moyenne des lames écoulées sur 7 ans	:	48,5 mm
-- " " " " " " 50 "	:	66 mm
-- Ecart-type des lames écoulées sur 7 ans	:	43,3 mm
-- " " " " " " 50 "	:	86,9 mm

L'analyse statistique des lames écoulées sera effectuée plus loin.

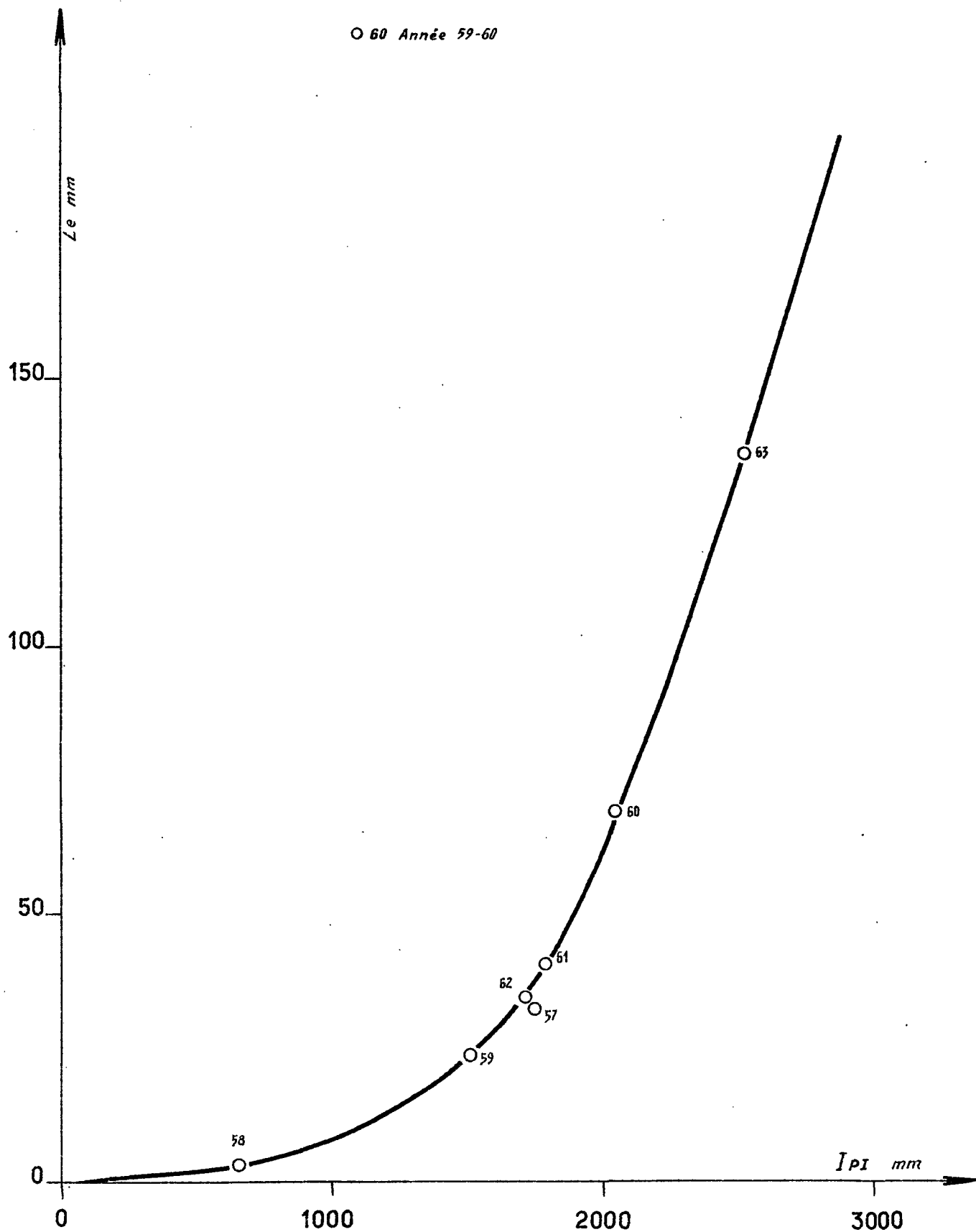
B - LAVRAS-PATOS -

A ICÓ, le problème était aisé car les débits de la période 1957-63 étaient dignes de confiance et la corrélation lames-pluies indicielles peu dispersée. Il en est autrement à LAVRAS-PATOS : la corrélation lames-pluies indicielles est des plus lâches et, hormis 1961-63, nous ne savons pas

CORRÉLATION LAME ÉCOULÉE - INDICE PLUVIOMÉTRIQUE A ICÓ

Gr_6

○ 60 Année 59-60



PRÉCISION DE L'ESTIMATION HYDROPLUVIOMÉTRIQUE DES LAMES ÉCOULÉES A ICÓ

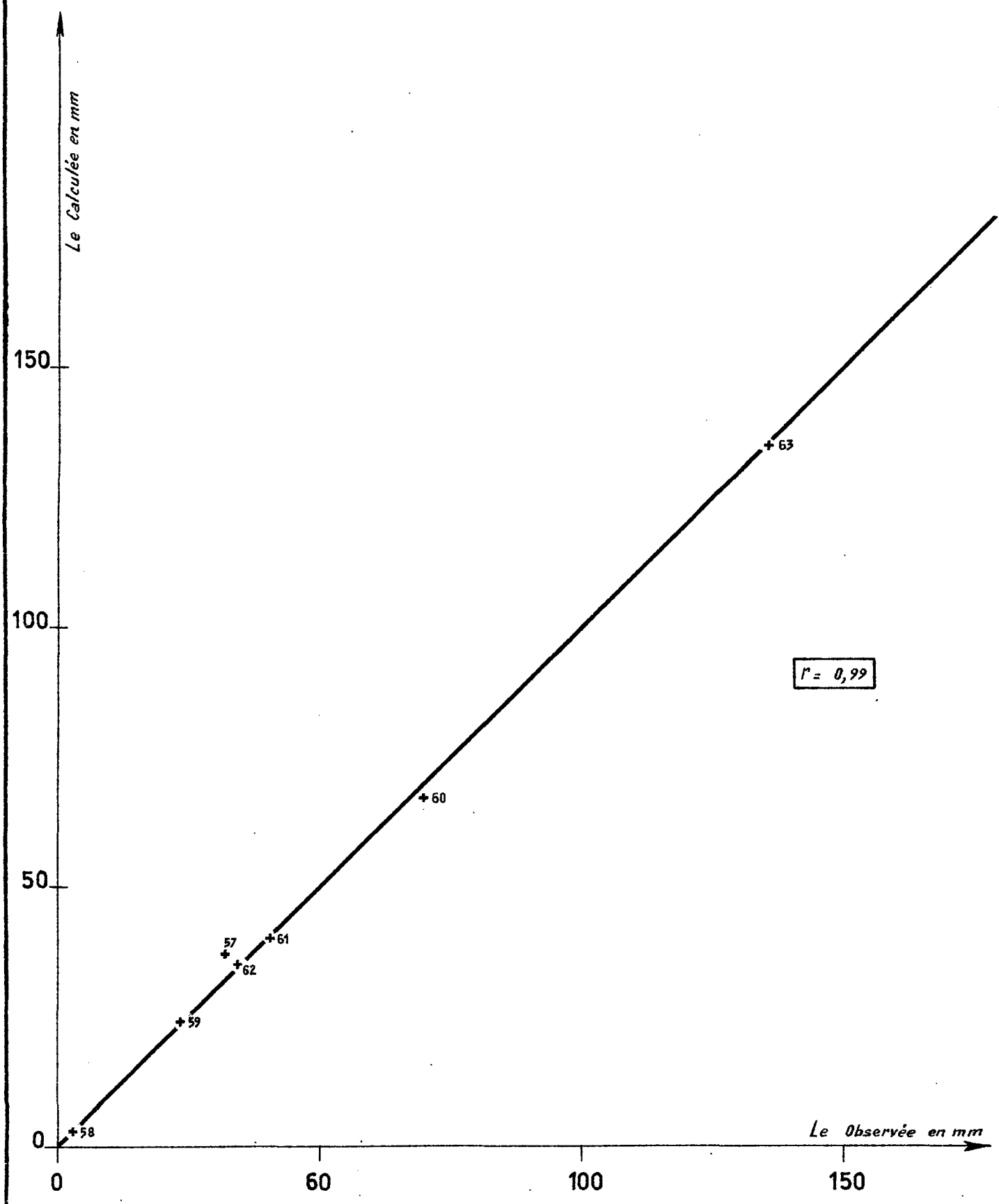


TABLEAU N° 7

CORRELATIONS HYDROPLUVIOMETRIQUES à ICÓ et LAVRAS-PATOS

Année	Pi	ICÓ		LAVRAS-PATOS	
		I _{PT}	L. obs.:L. calc.:	I _{PT}	L. obs.:L. calc.:
1913-14	884	1 708	34	1 339	1,2 : 22
14-15	380	618	3	512	3,5 : 3
15-16	955	1 813	42	1 697	36
16-17	1 245	3 430	280	3 099	222
17-18	1 152	2 375	111	2 314	91
18-19	436	225	0,5	172	0,5
19-20	801	2 057	67	1 927	52
1920-21	1 179	2 564	140	2 185	40,3 : 76
21-22	1 228	2 360	110	2 465	65,6 : 116
22-23	1 083	2 061	68	1 933	42,3 : 52
23-24	1 659	4 533	460	3 954	193,5 : 370
24-25	1 216	2 927	200	2 943	89,7 : 195
25-26	886	1 414	21	1 325	81,1 : 21
26-27	680	1 453	21	1 223	36,6 : 18
27-28	714	1 552	26	1 415	35,3 : 24
28-29	779	1 333	17	1 244	42,6 : 18
29-30	662	885	6	788	2,95 : 7
1930-31	760	1 530	24	1 482	27
31-32	472	357	2	382	1
32-33	881	1 578	27	1 655	34
33-34	1 223	2 720	167	2 474	117
34-35	1 216	2 327	104	2 494	120
35-36	591	1 104	10	876	9
36-37	899	1 704	34	1 380	86,9 : 23
37-38	681	790	5	1 245	12 : 18
38-39	817	1 900	51	1 673	38,3 : 35
39-40	1 277	2 942	205	2 823	140,5 : 175
1940-41	841	1 516	24	1 449	34,7 : 26
41-42	426	596	3	451	4,7 : 2
42-43	975	1 564	26	1 620	36,3 : 33
43-44	691	1 130	11	932	24,6 : 10
44-45	983	1 697	34	1 553	42,9 : 30

TABLEAU N° 7 (suite)

Année	Pi	ICÓ			LAVRAS-PATOS		
		I _{PT}	L. obs.	L. calc.	I _{PT}	L. obs.	L. calc.
1945-46	840	1 241		14	1 084	19	14
46-47	1 139	2 939		200	2 592	297	137
47-48	767	1 274		15	1 241	48,5	18
48-49	867	1 693		34	1 757	98	40
49-50	814	2 014		62	1 762	67,5	40
1950-51	590	838		5	681	4,6	5
51-52	686	1 053		9	1 099	27,4	14
52-53	520	618		3	492	3,1	3
53-54	762	1 047		9	914	10,7	9
54-55	942	2 444		122	2 235	74	80
55-56	1 035	2 642		154	2 577	153,8	134
56-57	847	1 747	32,1	37	1 513	84,8	23
57-58	472	660	3,2	3	576	18,2	4
58-59	777	1 513	23,5	24	1 377	84,3	23
59-60	830	2 047	69,8	67	1 804	93,9	50
1960-61	941	1 792	40,5	40	1 688	34	35
61-62	847	1 714	34,5	35	1 585	24,7	31
62-63	1 081	2 532	135,6	135	2 228	98,5	31

Pi -- hauteur annuelle de précipitation indicielle sur le bassin d'ICÓ

I_{PT} -- indice pluviométrique d'écoulement sur le bassin d'ICÓ

I_{PL} -- " " " " " " " " de LAVRAS

L.obs. -- lame d'écoulement annuelle observée, c'est-à-dire calculée d'après le barème d'étalonnage

L.calc. -- lame d'écoulement annuelle calculée à partir de la corrélation hydropluviométrique

Les valeurs soulignées des lames observées à LAVRAS-PATOS sont les seules ayant servi à l'établissement de la corrélation hydropluviométrique.

quelles sont les années dignes de confiance sur le plan des débits, c'est-à-dire celles auxquelles s'applique correctement l'étalonnage adopté. Nous avons choisi les hypothèses de travail suivantes :

- le régime de l'écoulement annuel à LAVRAS-PATOS est très comparable à celui d'ICÓ, quoique légèrement moins abondant sur le plan de la lame écoulée, la part des terrains sédimentaires y étant relativement plus grande,
- la corrélation hydropluviométrique doit avoir la même forme que celle d'ICÓ et s'appuyer sur les 3 années sûres 1961-63,
- on retiendra, pour le tracé de cette corrélation et le choix des coefficients d'ajustement, toutes les années qui respecteront les 2 conditions précédentes.

Très rapidement, le nuage de points diffus du graphique 5 s'est organisé en plusieurs séries d'années successives, les unes comparables à 1961-63, les autres très nettement différentes. Il n'y a guère eu d'hésitation dans le choix des années valables et des années à écarter par suite de l'emploi d'un étalonnage inadapté. Nous reparlerons de ces dernières à la fin de ce chapitre.

On trouvera, sur le graphique 8, la corrélation entre les lames écoulées et l'indice pluviométrique d'écoulement I_{PL} calculé comme suit :

$$I_{PL} = \sum(A_m - 50) + \sum(VA_m - 50) + \sum(BS_m - 150) + \sum(C_m - 150)$$

avec les mêmes notations que pour I_{PI} .

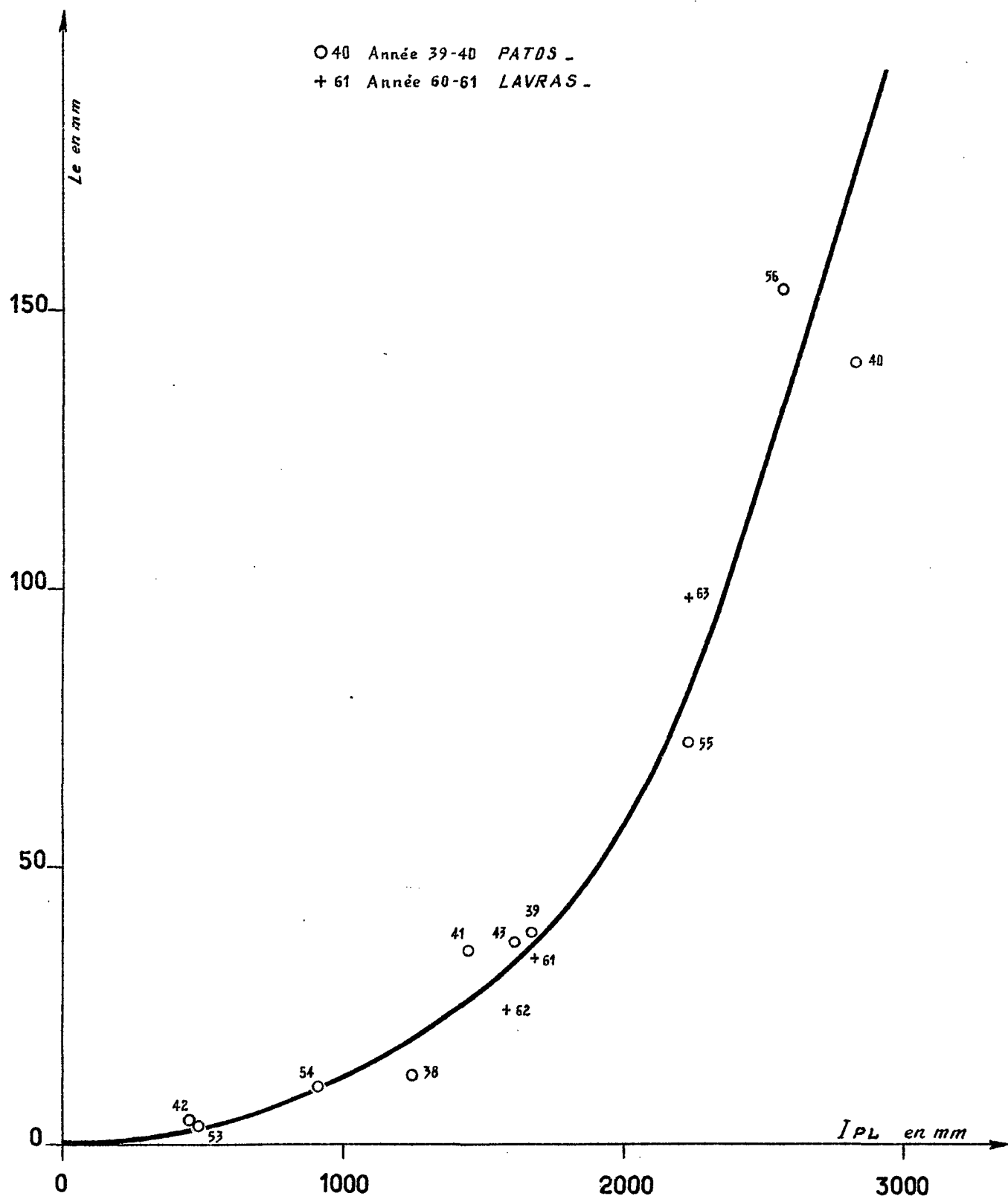
Les périodes utilisées ont été : 1938-43 à PATOS
1953-56 à PATOS
1961-63 à LAVRAS (SUDIENE)

Elles représentent au total 13 années sur 37 ans de relevés.

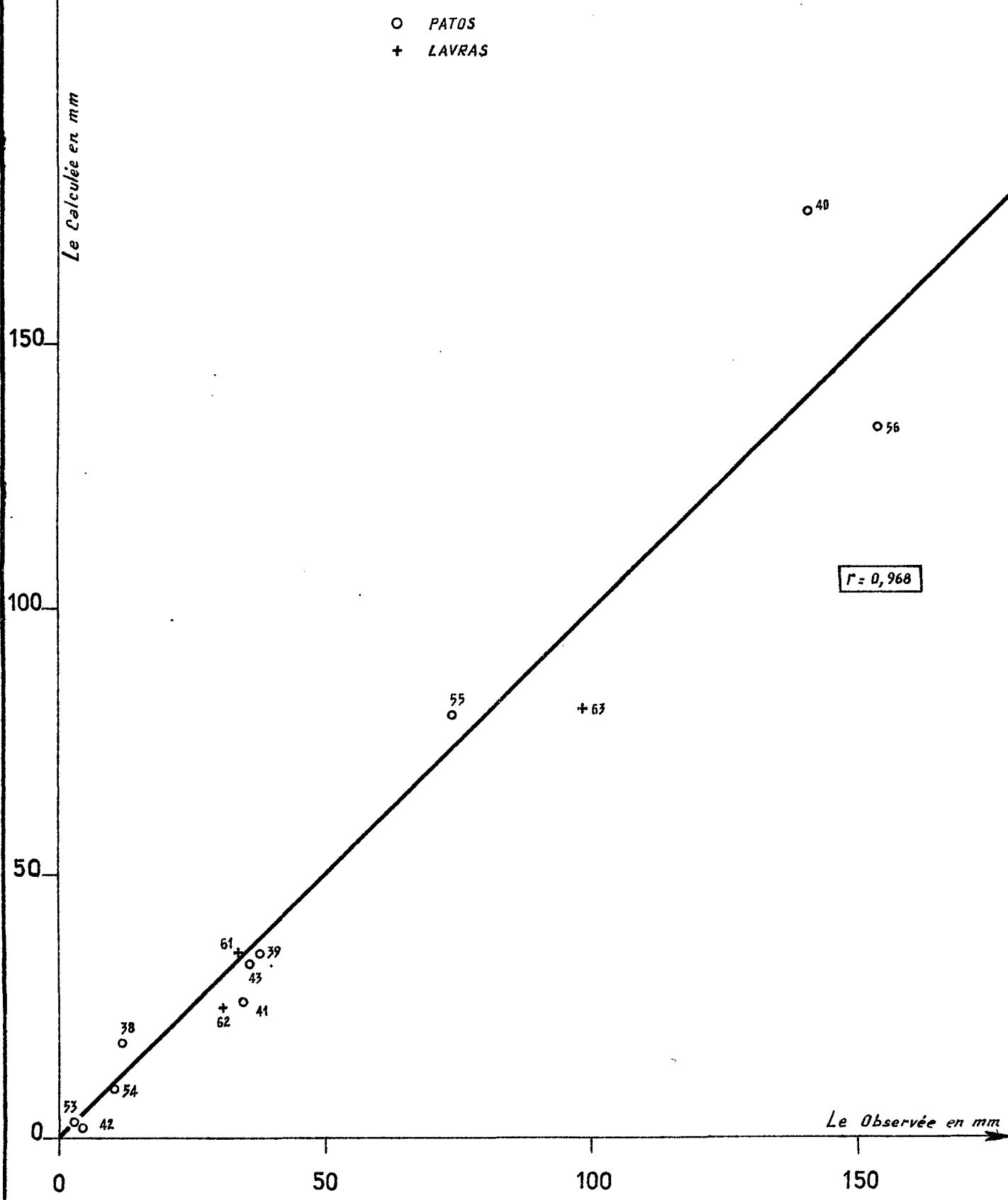
La corrélation, quoique plus lâche que pour ICÓ, est encore très satisfaisante pour un bassin de 9 000 km² à régime torrentiel. L'ajustement a été fait graphiquement ; la courbe possède une forme comparable à celle d'ICÓ. Toutes les données relatives à cette corrélation : lames observées, lames calculées et indice I_{PL} , figurent dans le tableau n° 7.

CORRÉLATION LAMES ÉCOULÉES - INDICES PLUVIOMÉTRIQUES A LAVRAS - PATOS

Gr-8



PRÉCISION DE L'ESTIMATION HYDROPLUVIOMÉTRIQUE DES LAMES ÉCOULÉES A LAVRAS-PATOS



La comparaison des lames observées et calculées pour les 13 années valables est représentée sur le graphique n° 9 ; le coefficient de corrélation vaut 0,968. Les écarts entre lames observées et lames calculées sont compris dans 90 % des cas entre ± 7 mm, ce qui n'est pas très important. Il est vraisemblable que les 37 années déduites de la corrélation réduisent légèrement la dispersion naturelle de l'échantillon complet, mais ceci est pratiquement négligeable.

En effet, la dispersion qui subsiste est encore considérable et l'écart-type de la série calculée plus fort que celui de la série observée en 13 ans :

- Moyenne des lames écoulées sur 13 ans	:	51,1 mm
- " " " " " " 50 "	:	54,6 mm
- Ecart-type des lames écoulées sur 13 ans	:	52,5 mm
- " " " " " " 50 "	:	69,5 mm

Il est opportun de signaler que, dans ces corrélations hydropluviométriques dans lesquelles la lame écoulée peut passer de 1 à 400 mm, la précision relative est très faible sur les petites valeurs mais, en valeur absolue, l'erreur est bien moins importante et son influence sur les caractéristiques de l'échantillon encore moindre.

Analyse statistique des lames écoulées annuelles :

On trouvera, sur le tableau n° 8, les deux échantillons de 50 lames écoulées d'ICO et de LAVRAS-PATOS, classées par ordre décroissant avec leur fréquence au dépassement $F = \frac{r-1}{2}$, et qui proviennent des périodes observées ou calculées suivantes : 50

Station	Lames observées	Lames calculées
ICO	1956-57 à 1962-63	1913-14 à 1955-56
LAVRAS-PATOS	1937-38 à 1942-43	1913-14 à 1936-37
	1952-53 à 1955-56	1943-44 à 1951-52
	1960-61 à 1962-63	1956-57 à 1959-60

TABLEAU N° 8

LAMES ECOULEES ANNUELLES CLASSEES

(mm)

Rang	Fréquence	ICÓ	LAVRAS-PATOS
1	0,01	460	370
2	0,03	280	222
3	0,05	205	195
4	0,07	201	154
5	0,09	200	141
6	0,11	167	137
7	0,13	154	120
8	0,15	140	117
9	0,17	136	116
10	0,19	122	98
11	0,21	111	91
12	0,23	110	76
13	0,25	104	74
14	0,27	70	52
15	0,29	68	52
16	0,31	67	50
17	0,33	62	40
18	0,35	51	40
19	0,37	42	38
20	0,39	40	36
21	0,41	35	36
22	0,43	34	35
23	0,45	34	34
24	0,47	34	34
25	0,49	34	30
26	0,51	32	28
27	0,53	27	27
28	0,55	26	25
29	0,57	26	24
30	0,59	24	23
31	0,61	24	23
32	0,63	24	22
33	0,65	21	21
34	0,67	21	18

TABLEAU N° 8

(suite)

Rang	Fréquence	ICÓ	LAVRAS-PATOS
35	0,69	17	18
36	0,71	15	18
37	0,73	14	14
38	0,75	11	14
39	0,77	10	<u>12</u>
40	0,79	9	<u>11</u>
41	0,81	9	10
42	0,83	6	9
43	0,85	5	7
44	0,87	5	5
45	0,89	<u>3</u>	<u>2</u>
46	0,91	3	4
47	0,93	3	<u>3</u>
48	0,95	3	3
49	0,97	2	1
50	0,99	0,5	0,5

	<u>ICÓ</u>	<u>LAVRAS-PATOS</u>
Médiane	33	29
Moyenne	66	54,6
Ecart-type	86,9	69,5
Coefficient de variation	1,31	1,27

N.B.- Les valeurs soulignées ont été observées.

On constate immédiatement l'extrême dispersion des échantillons caractérisée par un écart-type supérieur à la moyenne (donc un coefficient de variation plus grand que l'unité) et la dissymétrie accusée de la répartition vers les faibles valeurs mise en évidence par l'écart entre moyennes et médianes.

Comme il fallait s'y attendre, au vu de la forme de la corrélation lame écoulee-indice pluviométrique, et sachant que dans la région c'est seulement la racine carrée de la hauteur annuelle de précipitation ponctuelle qui est normalement distribuée, la série des lames écoulées ne suit pas une loi de GAUSS. La dissymétrie des échantillons nous a conduit à tenter l'ajustement par l'intermédiaire d'une loi de GALTON dans laquelle c'est le logarithme de la lame écoulee qui serait normalement distribué. Le résultat a été concluant pour les 2 stations.

Sachant que la loi de GALTON a pour fonction de répartition :

$$F = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{1}{2} z^2} dz$$

avec $z = a \log (L-L_0) + b$

L'ajustement a été fait graphiquement (gr. n° 10 et 11) ; on en a déduit les valeurs des paramètres :

à ICÓ : $z = 1,92 \log (L + 3) - 2,98$

à LAVRAS-PATOS : $z = 2,10 \log (L + 3) - 3,18$

La validité de ces 2 ajustements a été corroborée par le test du χ^2 de PEARSON, qui a fourni les résultats suivants :

	: Degré de liberté:	χ^2	: Probabilité de dépassement:
LAVRAS	2	1,42	10 % < P < 90 %
ICÓ	2	3,15	10 % < P < 90 %

On a déduit de ces ajustements les valeurs des lames écoulées pour des années de fréquence rare ; elles sont rassemblées dans le tableau suivant où l'on a fait figurer également les mêmes valeurs exprimées en m³/s (le calcul a été fait pour LAVRAS et non pour PATOS).

Valeur	Fréquence	ICÓ		LAVRAS-PATOS	
		Lame (mm)	Module (m ³ /s)	Lame (mm)	Module (m ³ /s)
Centenaire	0,01	581	219	419	112
Cinquantenaire	0,02	414	156	307	82
Décennale	0,10	163	61	130	35
Moyenne		66	24,9	54,6	14,6
Médiane	0,50	33	12,5	29	7,8
Décennale	0,90	4,7	1,7	5	1,3
Cinquantenaire	0,98	0,05	0,02	0,45	0,12

Il faut indiquer que ni la corrélation hydropluviométrique pour les années très sèches, ni l'ajustement graphique de la loi de GALTON ne sont très précis, de sorte que l'on ne peut accorder une grande confiance aux valeurs de fréquence supérieure à 0,98 tirées de cette analyse. Ainsi, le calcul donne, pour les 2 stations, une lame nulle pour la fréquence 0,99 ; cela ne permet nullement d'affirmer que le rio SALGADO puisse rester complètement sec 1 année sur 100 en moyenne.

Les résultats de l'analyse statistique confirment les nuances distinctives du régime entre LAVRAS-PATOS et ICÓ :

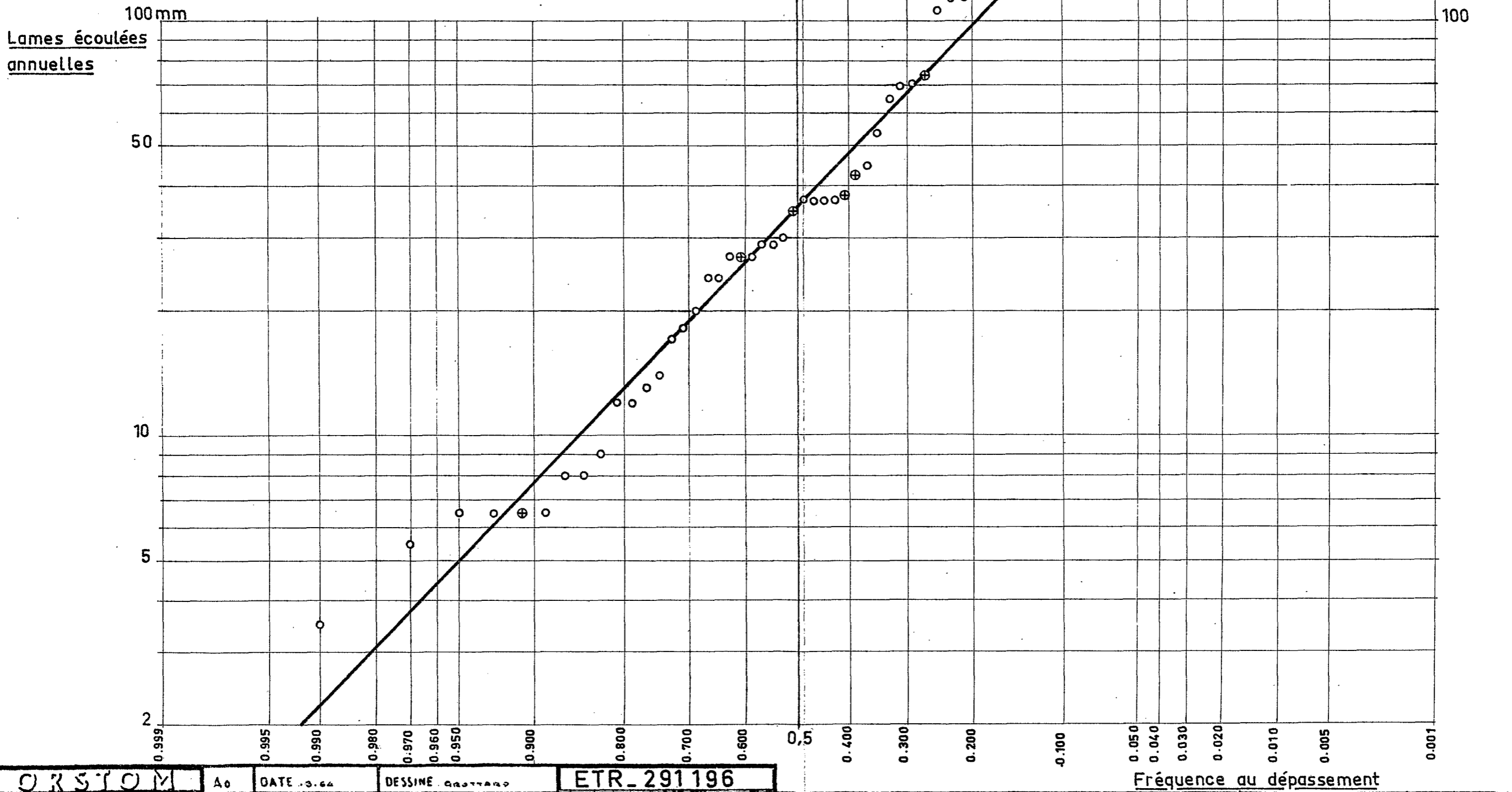
- irrégularité plus grande à ICÓ due à une abondance supérieure en année très humide mais inférieure en année très sèche (sur le plan des lames écoulées).

ICÓ

Gr. 10

Analyse statistique des lames écouleées annuelles

⊕ Valeur observée
○ Valeur calculée



ORSTOM

A0

DATE 13.64

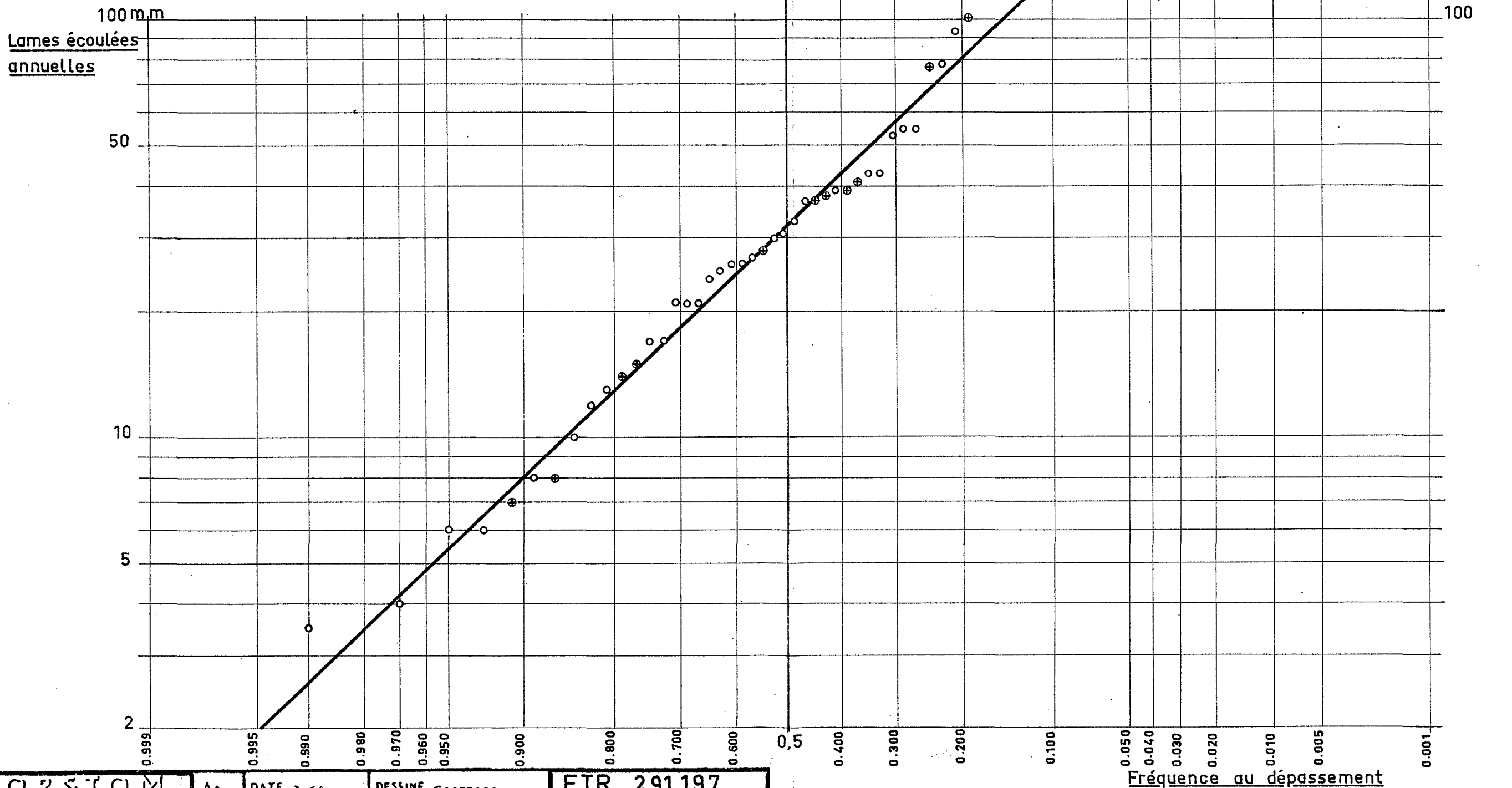
DESSINE GASTARD

ETR_291196

Fréquence au dépassement

Analyse statistique des lames écoulées annuelles

⊕ Valeur observée
○ Valeur calculée



Ceci s'explique assez bien en considérant que la proportion des terrains cristallins est plus élevée relativement dans le bassin d'ICÓ que dans celui limité à l'amont de LAVRAS ou PATOS (supériorité en année humide) et que les pertes dans le lit très large sont plus importantes que les très faibles apports (infériorité en année sèche).

Mis à part les coefficients de variation qui ont déjà été cités comme exceptionnellement grands puisque égaux respectivement à 1,31 et 1,27 pour ICÓ et LAVRAS, il est coutumier d'exprimer l'irrégularité interannuelle d'un régime par le rapport K_3 des modules de fréquence décennale ; ce rapport vaut 36 à ICÓ et 27 à LAVRAS.

Pour clore ces quelques remarques sur le régime du rio SALGADO, nous donnerons les valeurs spécifiques du module moyen :

- 2,1 l/s.km² à ICÓ
- 1,7 l/s.km² à LAVRAS,

lesquelles montrent bien la faiblesse des apports moyens qui, conjuguée à l'extrême irrégularité, constitue la caractéristique essentielle du régime hydrologique.

La signification des moyennes des échantillons est encore précaire avec 50 ans de relevés ; en effet, bien que la distribution ne soit pas normale, l'erreur type sur l'estimation de la moyenne \hat{L} se rapproche cependant de $\sigma_{\hat{L}} = \frac{\hat{\sigma}_L}{\sqrt{N}}$ où $\hat{\sigma}_L$ est l'estimation de l'écart-type sur

$N = 50$ ans.

Etant donné que l'écart-type est supérieur à la moyenne, celle-ci peut être sujette à de grandes variations. On ne peut, par exemple, avec 90 % de chances (intervalle de confiance), affirmer quelle est sa vraie valeur dans l'intervalle : $\hat{L} \pm 1,64 \sigma_{\hat{L}}$, ce qui donne pour nos 2 stations, en passant aux modules :

- ICÓ : 24,9 m³/s \pm 7,5 m³/s (90 %)
- LAVRAS : 14,6 m³/s \pm 4,4 m³/s (90 %)

On pourrait peut-être améliorer cette estimation en recourant à de plus longues séries d'observations pluviométriques approchant du siècle (FORTALEZA ou QUIXERAMOBIM) mais la corrélation hydropluviométrique serait certainement moins bonne et le gain final peu important.

Au stade de l'avant-projet d'aménagement, nous pensons que les séries de 50 années ainsi reconstituées doivent suffire aux ingénieurs projeteurs pour :

- rechercher le volume optimal d'accumulation,
- évaluer la réserve de sécurité répondant aux besoins minimaux lors d'une série noire d'années sèches successives,
- établir un premier bilan sommaire de la retenue permettant de dégager les volumes disponibles, déduction faite des pertes par évaporation et éventuellement infiltration.

Pour entrer plus en détail dans cette étude, ce qui paraît prématuré actuellement, il faut envisager la distribution des débits au cours de l'année.

33 - Les DEBITS MOYENS MENSUELS -

Il serait ultérieurement possible de procéder, si le besoin s'en faisait sentir, à la reconstitution de séries de débits mensuels par corrélations hydropluviométriques comme nous venons de le faire pour les modules annuels. La résolution de ce problème n'est peut-être pas plus compliquée a priori : il faudrait, pour chaque mois, rechercher les facteurs principaux et secondaires de l'écoulement. Pour les mois de hautes eaux (Janvier à Avril), le facteur principal serait vraisemblablement la hauteur mensuelle de précipitations (moyenne indicielle ou pondérée selon les terrains géologiques) et le (ou les) facteur secondaire serait la (ou les) hauteur de précipitation du (ou des) mois précédent. Pour les mois de basses eaux (Mai à Août), l'écoulement de tarissement est généralement en corrélation étroite avec la hauteur de précipitation totale des mois précédents.

Dans ce rapport, nous nous contenterons de présenter les débits mensuels observés pendant les périodes reconnues valables lors de l'analyse des modules : 7 ans à ICÓ, 13 ans à LAVRAS-PATOS. On trouvera ces débits et les moyennes de période dans les tableaux n° 9 et 10.

La période 1957-63 à ICÓ est assez déficitaire puisque son module moyen $18,3 \text{ m}^3/\text{s}$ ne représente que 73 % du module moyen estimé sur 50 ans ; il faut donc regarder les débits moyens mensuels de cette période comme légèrement sous-estimés.

Pour LAVRAS-PATOS, nous avons admis que la station unique était à LAVRAS et réduit les débits observés à PATOS dans le rapport des bassins versants, soit 0,913 ; ce n'est peut-être pas exact mais l'erreur doit être faible. Les 13 années y fournissent une représentation assez conforme de la répartition des débits moyens mensuels puisque le module de $13,7 \text{ m}^3/\text{s}$ équivaut à 94 % du module estimé sur 50 ans.

La saison des hautes eaux est très concentrée ; le trimestre Février-Avril voit s'écouler 93 % en moyenne de l'apport annuel avec une prédominance marquée (42 % en moyenne) pour le mois de Mars, les 2 autres mois étant à peu près à égalité. Les 5 mois de tarissements de Mai à Septembre contribuent en moyenne pour 4,5 % aux apports annuels ; la part des 4 mois de début de saison des pluies : Octobre à Janvier, est réduite à 2,5 % en moyenne.

Dans la réalité, l'irrégularité des apports mensuels est évidemment plus grande encore que celle des années. On trouve ainsi, pour le seul trimestre de hautes eaux, des débits observés extrêmes en 13 ans à LAVRAS :

- de 0 et $298 \text{ m}^3/\text{s}$ en Février
- de 2,4 " $235 \text{ m}^3/\text{s}$ en Mars
- de 2,6 " $214 \text{ m}^3/\text{s}$ en Avril.

L'irrégularité d'occurrence des précipitations se reflète dans celle de l'éventualité d'écoulement pour un mois donné. Les relevés complets de hauteurs d'eau à LAVRAS-PATOS peuvent nous renseigner sur ce point. On y dispose de 41 années en 2 périodes :

- 1910-11 à 1914-15
- 1936-37 à 1962-63.

TABLEAU N° 9

RIO SALGADO à ICÓ - 11 920 km²

Débits moyens mensuels observés (en m³/s)

Année	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	Module
1956-57	0	0	0	0	0,17	40,8	102	2,8	0,09	0	0	0	12,1
1957-58	0	0	0	0	0,47	8,2	4,9	0,7	0,08	0	0	0	1,2
1958-59	0	0	0	2,7	42,2	56,3	4,0	0,08	3,5	0,17	0,01	0	8,9
1959-60	0	0	0	0	0	244,8	60,9	6,5	0,36	0,05	0	0	26,4
1960-61	0	0	0	8,9	51,7	77,1	42,5	5,9	0,41	0,04	0	0	15,3
1961-62	0	0	0	0	16,2	82,0	45	11,4	1,2	0,03	0	0	13,0
1962-63	0	0	1,3	1,0	121,7	455,0	(30)	5,3	1,1	(0,36)	(0,05)	0	51,2
Moyenne sur la période	0	0	0,2	1,8	33,2	137,7	41,3	4,7	0,96	0,09	0,01	0	18,3

TABLEAU N° 10

RIO SALGADO à LAVRAS - 8 480 km²

Débits moyens mensuels observés (en m³/s)

Année	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	Module
1937-38	0	0	0	(0)	2,05	25,8	8,9	1,44	0,26	0,05	0,02	0	3,2
1938-39	0	0	0	0,04	57,2	52,1	7,8	9,7	0,29	0,09	0,11	0,01	10,3
1939-40	0	0,05	0,01	5,8	12	199	178	46,3	8,5	1,43	0,46	0,23	37,7
1940-41	0,09	0,02	0	1,66	13,5	69,3	16,9	9,3	0,62	0,27	0,05	0,01	9,3
1941-42	0	0	0	0	6,7	2,4	4,8	1,42	0,09	0,02	0	0	1,2
1942-43	9,7	0,17	4,67	9,8	10,6	73,3	7,1	0,93	0,21	0,05	0,01	0	9,8
1952-53	0	0	0	0	0	4,7	2,6	0,02	0	0	0	2,65	0,85
1953-54	0,16	0,73	0,36	4,4	11,2	13,4	2,6	1,94	0,28	0,06	0	0	2,9
1954-55	0	0	0	0,24	26,5	2,8	214	0,35	0,23	0,02	0	0	19,9
1955-56	0	0	0,74	0,03	298	147	62	0,48	0,25	0,02	0	0	41,3
1960-61	0	0	(0)	(11)	(30)	42,4	24,6	2,8	0,26	0,02	0	0	9,1
1961-62	0	0	0	0	18,8	37,5	19,5	(5,2)	0,58	0,27	0,01	0	6,6
1962-63	0	1,3	1,2	2,7	59,2	(235)	14,4	2,9	0,75	0,39	0,21	0,02	26,5
Moyenne sur la période	0,77	0,17	0,54	2,7	42	69,6	43,3	6,4	0,95	0,21	0,07	0,22	13,7

N.B.- Les débits des sous-périodes 1937-43 et 1952-56 sont déduites de PATOS, proportionnellement au rapport des surfaces de bassins.

On en déduit la probabilité, pour un mois donné, d'être l'objet d'un écoulement superficiel :

Octobre	10 ‰	Février	90 ‰	Juin	90 ‰
Novembre	20 ‰	Mars	100 ‰	Juillet	80 ‰
Décembre	25 ‰	Avril	100 ‰	Août	40 ‰
Janvier	50 ‰	Mai	100 ‰	Septembre	20 ‰

La probabilité élevée des derniers mois tient au fait qu'ils bénéficient presque chaque année du tarissement de la crue survenue avant Mai.

34 - COEFFICIENTS et DEFICITS ANNUELS d'ÉCOULEMENT -

Ces grandeurs ont été calculées pour les 2 stations d'ICÓ et de LAVRAS-PATOS pour la période de 50 ans couverte par l'échantillon des lames écoulées (observées et calculées), en utilisant la hauteur de précipitation indicielle P_i définie au début de ce chapitre et dont les valeurs se trouvent dans le tableau n° 7 ; pour LAVRAS-PATOS, on a pris $1,02 P_i$.

Les résultats de ces calculs sont rassemblés dans le tableau n° 11. Les déficits d'écoulement annuels sont étroitement liés dans leur dispersion à celle des précipitations ; ils admettent des valeurs moyennes de 800 et 830 mm environ à ICÓ et LAVRAS. Le coefficient moyen d'écoulement passe de 5 ‰ à LAVRAS à 6,1 ‰ à ICÓ ; un tel ordre de grandeur classe bien le régime du rio SALGADO dans les régimes tropicaux à tendance subdésertique.

35 - SIGNIFICATION des OBSERVATIONS HYDROMÉTRIQUES non RETENUES à LAVRAS -

A l'issue de la confrontation hydropluviométrique, il a été décidé de retenir seulement 13 années sur 37. En d'autres termes, les 24 années écartées ne le sont pas parce que leurs relevés sont douteux mais parce que l'étalonnage adopté ne s'y applique pas. On peut vérifier le bien-fondé de cette supposition en analysant, dans le déroulement chronologique des relevés, les variations de l'étalonnage réel et en recherchant leurs causes les plus plausibles.

TABLEAU N° 11

COEFFICIENTS et DEFICITS d'ECOULEMENT ANNUELS

Année	ICÓ		LAVRAS-PATOS	
	Ke %	Déficit (mm)	Ke %	Déficit (mm)
1913-14	3,8	850	2,4	880
1914-15	0,80	377	0,8	384
1915-16	4,4	913	3,7	938
1916-17	22,5	965	17,5	1 050
1917-18	9,6	1 041	7,8	1 082
1918-19	0,10	435	0,1	443
1919-20	8,4	734	6,3	768
1920-21	11,9	1 039	6,3	1 129
1921-22	9,0	1 118	9,2	1 138
1922-23	6,3	1 015	4,7	1 053
1923-24	27,8	1 199	21,8	1 323
1924-25	16,4	1 016	15,7	1 045
1925-26	2,4	865	2,3	883
1926-27	3,1	659	2,6	677
1927-28	3,6	688	3,3	705
1928-29	2,2	762	2,3	777
1929-30	0,90	656	1,0	669
1930-31	3,2	736	3,5	747
1931-32	0,4	470	0,2	479
1932-33	3,1	854	3,8	865
1933-34	13,6	1 056	9,4	1 129
1934-35	8,6	1 112	9,7	1 119
1935-36	1,7	581	1,5	594
1936-37	3,8	865	2,5	892
1937-38	0,7	676	1,7	683
1938-39	6,2	766	4,6	796
1939-40	16,1	1 072	10,8	1 159
1940-41	2,8	817	4,0	823
1941-42	0,7	423	1,1	430
1942-43	2,7	949	3,6	959
1943-44	1,6	680	1,4	696
1944-45	3,5	949	2,9	976

TABLEAU N° 11 (Suite)

Année	ICÓ		LAVRAS-PATOS	
	Ke %	Déficit (mm)	Ke %	Déficit (mm)
1945-46	1,7	826	1,6	844
1946-47	17,6	939	11,8	1 024
1947-48	2,0	752	2,3	765
1948-49	3,9	833	4,5	843
1949-50	7,6	752	4,8	790
1950-51	0,8	585	0,8	596
1951-52	1,3	677	2,0	686
1952-53	0,6	517	0,6	527
1953-54	1,2	753	1,4	765
1954-55	13,0	820	7,7	887
1955-56	14,9	881	14,6	901
1956-57	3,8	815	3,2	835
1957-58	0,7	469	0,8	478
1958-59	3,0	753	2,9	769
1959-60	8,4	760	5,9	797
1960-61	4,3	900	3,5	925
1961-62	4,1	812	2,9	839
1962-63	12,5	945	8,9	1 004
Minimum	0,1	377	0,1	384
Moyenne	6,1	802	5,0	831
Maximum	27,8	1 199	21,8	1 323

N.B.- Les valeurs soulignées ont été observées.

Les 13 années retenues se groupent en 3 périodes :

- 1938-43, soit 6 ans à PATOS
- 1953-56, soit 4 ans à PATOS
- 1961-63, soit 3 ans à LAVRAS.

Chacune de ces périodes commence par une année de faible écoulement et se termine par une année d'une relative abondance.

Le déroulement chronologique des relevés écartés a été représenté sur le graphique n° 12 où les lames d'eau calculées à partir de l'étalonnage adopté figurent en fonction de l'indice pluviométrique d'écoulement I_{PL} ; la droite de corrélation retenue à LAVRAS a aussi été représentée. Toutes les années se groupent en périodes bien distinctes pour lesquelles, par rapport à la corrélation hydropluviométrique retenue, l'étalonnage adopté conduit à une sous-estimation ou à une surestimation des lames écoulées.

Dans le cas de la sous-estimation, cela veut dire que, pour une certaine cote à l'échelle, le débit était réellement supérieur au débit fourni par la courbe d'étalonnage, donc que le lit occupait une position plus "creusée" qu'au cours des 13 années de référence. Dans le cas de la surestimation, on est en présence de périodes avec lit plus "remblayé" que celui des années de référence.

On observe les périodes successives suivantes :

LAVRAS	1913-14 et 1914-15	2 ans peut-être sous-estimés (lit plus creusé)
"	1920-21 à 1924-25	5 ans sous-estimés (lit plus creusé)
"	1925-26 à 1928-29	4 ans surestimés (lit plus remblayé)
PATOS	1936-37	1 an surestimé (lit plus remblayé)
"	1937-38 à 1942-43	6 ans de référence
"	1943-44 à 1951-52	9 ans surestimés
"	1952-53 à 1955-56	4 ans de référence
"	1956-57 à 1959-60	4 ans surestimés
LAVRAS	1960-61 à 1962-63	3 ans de référence.

Les points des diverses périodes de relevés écartés se placent assez correctement sur des courbes parallèles à la courbe de corrélation :

A) courbe sous-estimée 1920-21 à 1924-25

- B) courbe surestimée 1926-27 à 1928-29
 1936-37
 1943-44 à 1951-52
- C) courbe très surestimée 1925-26
 1956-57 à 1959-60.

On peut donc admettre que l'étalonnage s'est maintenu constant au cours de chacune de ces périodes, le lit du fleuve y restant à peu près stable.

Il y a eu des modifications brutales d'étalonnage :

- en 1924-25, dues à un très fort remblaiement du lit
- en 1925-26, dues à un important creusement du lit
- en 1942-43, dues à un remblaiement du lit
- en 1955-56, dues à un fort remblaiement du lit, etc

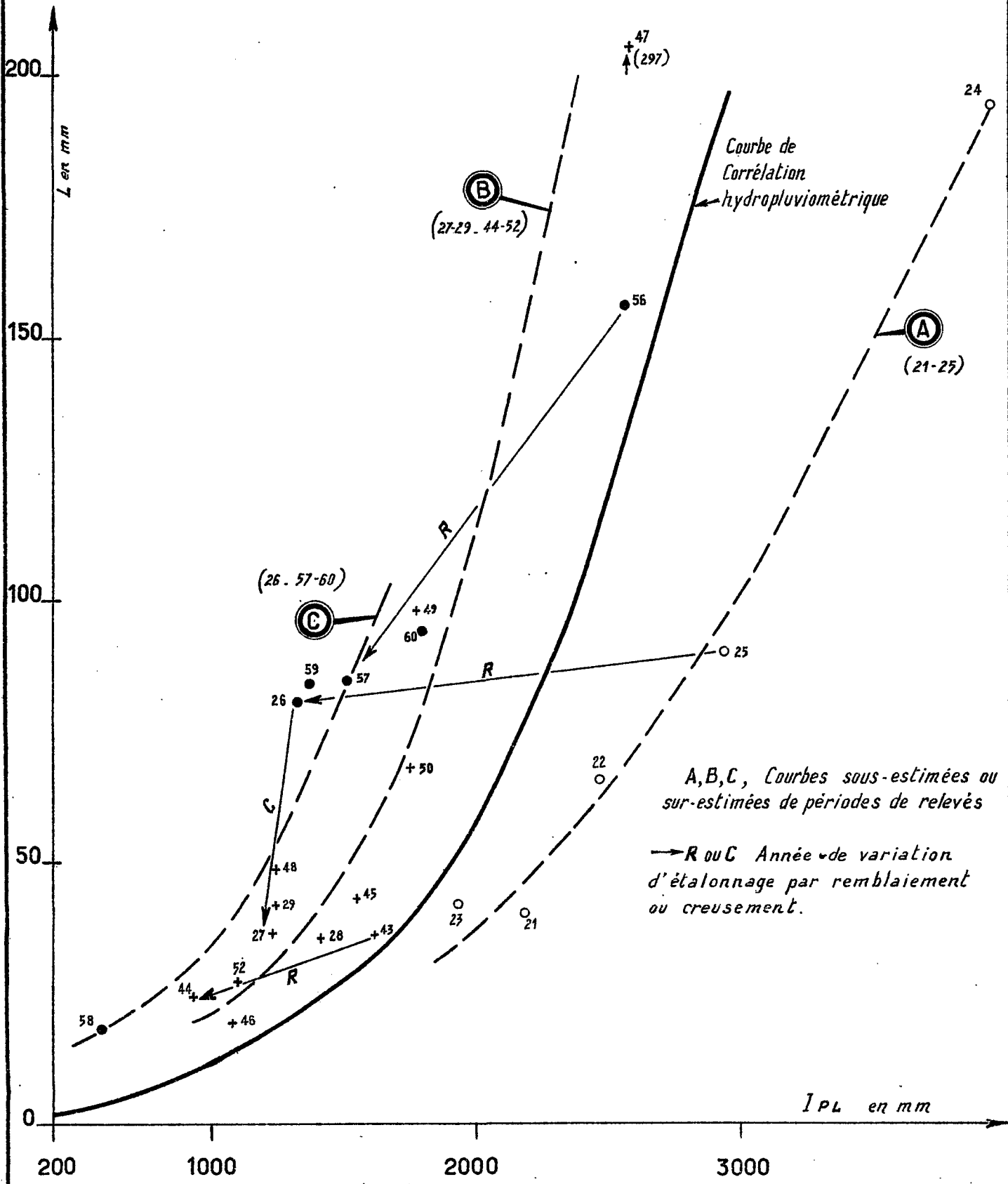
En règle générale, les variations du lit sont de 2 types :

- 1) fort remblaiement ou dépôt d'éléments solides transportés par une très forte crue : 1925, 1940, 1947, 1956 entraînant une modification de l'étalonnage, se manifestant l'année même ou l'année suivante selon la date de la crue -
- 2) creusement par action successive d'érosion due aux écoulements d'une suite d'années moyennes ou faibles à l'issue desquelles le lit retrouve à peu près sa position de référence : 1926 puis 1929 - 1949, 1950 puis 1952 - 1960.

Dans les grandes lignes, les variations de la charge hydraulique expliquent les phases de creusement et de remblaiement du lit auxquelles correspondent des modifications d'étalonnage. On pourrait ainsi arriver, par tâtonnements, à rétablir, pour chaque période ou série de périodes A, B, C, l'étalonnage valable et ainsi revalider les relevés hydrométriques. Le procédé serait long et peu élégant ; il ne fournirait peut-être pas d'excellents résultats. Nous estimons son emploi inutile à la connaissance des lames écoulées annuelles suffisamment précisée par la corrélation hydropluviométrique. Il pourrait être, par contre, judicieux si l'on devait entreprendre une étude statistique des écoulements mensuels, les corrélations hydropluviométriques pouvant manquer alors de précision.

SIGNIFICATION DES ANNÉES NON RETENUES A LAVRAS

Gr_12



L'analyse des étalonnages d'ICÓ, station beaucoup plus mobile que LAVRAS, montre que la variabilité n'affecte que les basses et moyennes eaux ; la mise en mouvement d'une certaine quantité d'alluvions du lit se reproduit systématiquement lors des crues quel que soit l'état initial du lit et conduit à un état d'écoulement à peu près stable. Ceci semble se produire pour des charges d'au moins 2 mètres et des débits supérieurs à 200 m³/s. On admettra ainsi que les débits de crue, obtenus à partir de l'étalonnage adopté, n'ont pas besoin de correction.

C H A P I T R E IV

ETUDE des FORTES CRUES

Cette étude des fortes crues du rio SAIGADO sera effectuée pour les 2 stations d'ICÓ et de LAVRAS--PATOS. Elle doit conduire à la détermination des crues exceptionnelles pour diverses fréquences et même à celle de la crue maximale probable. Dans l'hypothèse de l'édification d'une retenue sur le rio SAIGADO, des considérations extra-hydrologiques permettront aux ingénieurs projeteurs de fixer le risque contre lequel ils entendent se protéger et, par voie de conséquence, la fréquence, ou la période de retour, à prendre en considération dans le projet.

L'étude des fortes crues par les méthodes statistiques serait rapidement limitée pour ICÓ et même pour LAVRAS--PATOS où un échantillon de quelque 40 années ne permettrait pas d'extrapoler, avec assez de précision, au-delà de la fréquence centenaire. Ce procédé servira uniquement de contrôle à celui qui nous donnera le plus de possibilité : l'utilisation de la relation précipitation-écoulement à partir de la détermination d'une séquence pluvieuse de fréquence rare par le biais des stations--années.

Nous allons, au préalable, par l'analyse des fortes crues de la période d'observations, mettre en évidence les causes responsables de ces phénomènes et leurs caractéristiques.

41 -- FORMATION et CARACTERE des PRINCIPALES CRUES OBSERVEES --

L'extrême concentration de l'écoulement annuel sur le trimestre Février--Avril, avec prédominance du mois de Mars, doit se refléter dans l'éventualité d'apparition des fortes crues.

Si l'on classe, par périodes de 10 jours, les dates d'apparition des maximums annuels pour les 42 années observées à LAVRAS--PATOS, on peut faire les observations suivantes :

- l'intervalle maximal va du 25 Janvier au 7 Mai (103 jours),
- 90 % des crues surviennent entre le 20 Février et le 30 Avril (80 jours),

- 57 % des crues surviennent entre le 20 Mars et le 10 Avril (30 jours)
- avec 26 % des éventualités, la décade du 21 au 31 Mars est la plus favorisée.

Si l'on considère maintenant le fait que l'écoulement du rio SALGADO peut être assimilé à une succession de crues dont une bonne partie sont indépendantes entre elles (tout au moins en ce qui concerne leurs débits maximaux), le classement des dates d'apparition de ces crues indépendantes ne diffère guère de celui des maximums annuels si ce n'est par un léger accroissement des éventualités de la période 20 Février-10 Mars au détriment du mois d'Avril. Ceci corrobore une autre observation selon laquelle les plus fortes crues observées n'ont pas tendance à se produire exactement pendant les décades à plus forte probabilité mais plutôt vers la fin de la période d'éventualité 90 %, c'est-à-dire en Avril.

On aboutirait à des conclusions identiques pour ICÓ, la transmission de l'onde de crue, depuis LAVRAS, étant de l'ordre de 24 heures.

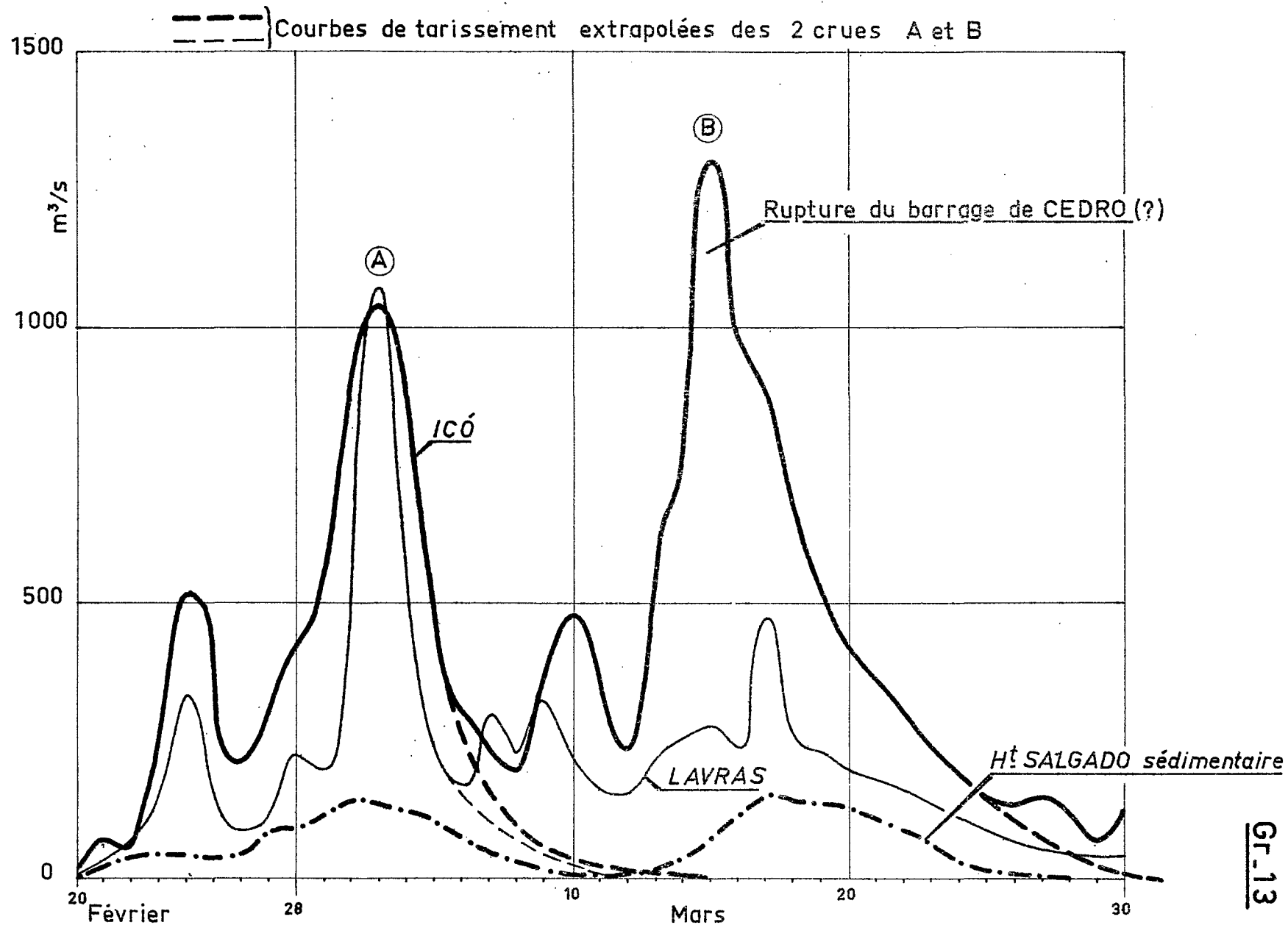
Une connaissance satisfaisante des motifs d'apparition et de formation d'une très forte crue ne peut être obtenue que si l'information pluviométrique est abondante et l'observation des hauteurs - donc des débits - précise. Une telle conjonction ne s'obtient qu'au cours des années récentes durant lesquelles on a eu la chance, en 1960 comme en 1963, d'enregistrer des crues qui se rangent parmi les plus fortes connues depuis 1910 avec celles de 1924, 1940 et 1947 entre autres.

Les crues de Février-Mars 1963 :

Une succession pratiquement ininterrompue de précipitations s'est abattue sur le bassin du rio SALGADO entre le 20 Février et le 25 Mars. La concentration et la composition de ces pluies a donné lieu à plusieurs ondes de crues qui se manifestent sous la forme d'un hydrogramme tourmenté à plusieurs pointes ; deux d'entre elles sont nettement plus fortes que les autres et suffisamment espacées pour être séparées. On trouvera sur le graphique n° 13 la représentation des hydrogrammes observés à LAVRAS et à ICÓ auxquels on a joint un hydrogramme des apports du haut SALGADO sédimentaire obtenu par simple addition des débits aux stations de QUIMAMI et MILAGRES. Cette représentation a été faite en utilisant un point par jour (le débit moyen journalier) par souci d'homogénéité avec la suite de cette étude, bien que l'on disposât de plusieurs observations par jour à LAVRAS et ICÓ.

RIO SALGADO

Crues de février et mars 1963



On a, en outre, tracé les courbes de tarissement des 2 principales crues telles qu'on les aurait observées si les pluies avaient alors cessé, et cela par analogie avec d'autres crues simples connues à tarissement non voilé.

L'examen de ce graphique montre la part négligeable des terrains sédimentaires dans la formation des crues à LAVRAS et à ICÓ :

- 10 à 15 % seulement du débit de pointe,
- 4 fois moins d'apport spécifique (volume écoulé par km²).

Les résultats quantitatifs confirment ces impressions (voir tableau n° 12) ; ils ont été calculés pour les crues A du 3 Mars et B du 15 Mars dont la séparation a été faite graphiquement ; on a tenu à différencier, dans les bassins de LAVRAS et ICÓ, les apports des zones sédimentaires et cristallines dont les superficies sont les suivantes :

	Bassin versant : à LAVRAS	B.V. intermédiaire entre LAVRAS et ICÓ	Bassin versant total à ICÓ
Zones sédimentaires	5 685 km ² (67 %)	-	5 685 km ² (48 %)
Zones cristallines	2 795 km ² (33 %)	3 440 km ²	6 235 km ² (52 %)
Surface totale	8 480 km ²		11 920 km ²

On a inclus, dans la superficie des zones sédimentaires, des terrains cristallins situés en amont de QUIMAMI et de MILAGRES et dont les apports, mêlés à ceux des terrains sédimentaires, n'en sont pas différenciables du point de vue de l'analyse globale que nous faisons ici.

Les hauteurs moyennes de précipitation ont été calculées jour par jour à partir des relevés de 10 pluviomètres, en appliquant à chacun d'eux un coefficient déduit de l'aire d'influence de cet appareil et corrigé en fonction de sa position géographique (par rapport au relief) ; les calculs ont été menés par secteurs de bassin, chaque secteur correspondant à une "bande isochrone" de réponse aux précipitations (voir plus loin).

TABLEAU N° 12

RESULTATS QUANTITATIFS des CRUES de MARS 1963

Donnée	Ht. SALGADO:	LAVRAS		ICÓ		
		Z. Crist.	B.V. total	Z. Crist. aval LAVRAS	Z. Crist. totale	B.V. total
<u>Crue A du 3 Mars</u>						
Hauteur moyenne de précipitation (mm)	205	229	213	214	214	210
Volume écoulé (10 ⁶ m ³)	112	256	368	221	477	589
Lame écoulée (mm)	19,7	91,6	43,3	64,4	76,5	49,4
Coefficient d'écoulement %	9,6	40	20,4	30,0	35,7	23,5
<u>Crue B du 15 Mars</u>		(*)				
Hauteur moyenne de précipitation (mm)	159	227	181	229	229	195
Volume écoulé (10 ⁶ m ³)	95,5	148,5	244	531	679,5	775
Lame écoulée (mm)	16,8	53,2	28,8	154 (1)	109	65
Coefficient d'écoulement %	10,6	23,2	15,9	67,4 (1)	47,6	33,3

(*) Certains relevés journaliers faisant défaut à LAVRAS les 9 et 10 Mars, la crue reconstituée est peut-être sous-estimée -

(1) Ces valeurs excessives sont certainement gonflées par l'apport artificiel dû à la rupture du barrage de la ville de CEDRO -

On ne peut mieux comprendre les origines des 2 crues de Mars 1963 qu'en examinant le déroulement chronologique de ces chutes de pluie journalières (voir tableau n° 13). Lorsque la situation météorologique favorable à la formation de précipitations revêt un caractère de stabilité temporaire, les pluies ne sont plus des événements isolés mais groupés en une véritable phase pluvieuse, comme celle du 20 Février au 23 Mars 1963. Les caractères d'une telle phase pluvieuse sont apparemment les suivants :

- très grande extension spatiale (en liaison avec l'aire soumise au type de temps causal),
- hauteur totale de précipitations peu dispersée d'un lieu à un autre puisque l'on trouve des coefficients moyens d'abattement compris entre 70 et 80 ‰ pour 6 000 km² environ,
- aucune forme typique du hyétogramme dans le temps constitué d'une succession de séquences ininterrompues de pluie journalière durant 4 à 6 jours en moyenne (2 à 9 aux extrêmes) et séparées par des accalmies de 2 à 3 jours,
- décalage possible de 24 à 48 heures entre les passages des séquences pluvieuses aux divers postes de la région intéressée,
- corrélation assez lâche des hauteurs de précipitation journalière d'une station à l'autre.

Pour qu'une telle phase pluvieuse engendre une très forte crue, deux conditions paraissent essentielles :

- a) saturation préalable du bassin, qui peut être le résultat de la 1ère séquence, l'efficacité au ruissellement de la phase pluvieuse n'apparaissant alors qu'avec la 2ème séquence -
- b) existence parmi les séquences d'un épisode intense de 3 à 5 jours au cours duquel les hauteurs journalières de précipitations vont dépasser 20 et 30 mm sur une grande surface.

TABLEAU N° 13

PRECIPITATIONS JOURNALIERES du 20 FEVRIER au 23 MARS 1963

(en mm)

Dates	OROS	UMARI	FELIZARDO	AURORA	QUINTAIUS	VARZEA ALEGRE	MILAGRES	MISSAO VELHA	BREJO SANTO	GRATO
20 Fév.	10,6	1,8	0,4	18,2	10,0			16,1		51,0
21	1,0	20,2	44,0		16,0	5,0		21,3	19,2	10,5
22	1,4	34,1	4,2	24,1	27,0	7,0				9,3
23	0,7	14,0	20,0	51,3	10,0	29,0		36,0	14,5	26,4
24			15,2	22,1	16,0					5,0
25	17,7				36,0	10,5			14,6	
26			0,9		14,0	6,6	21,0	48,0	95,2	10,0
27	13,3	81,1	41,9	41,4		8,8	33,0	29,0	7,5	72,0
28	14,9	42,5	32,4	36,4	28,2	2,0	11,0			
1er Mars	3,0	21,0	11,8		24,8		48,0	29,4	27,0	37,0
2	28,6	3,0	38,6	33,2		36,0	63,0	51,5	6,5	18,0
3			10,3	25,4	24,2	1,5	16,0			15,0
4	14,9		24,2				11,0	7,4		12,0
5				48,2		15,0				
6			4,6	31,6	11,0		12,5			2,0
7	31,5	5,2		22,5	9,0	14,5	10,0		2,5	
8	10,0	17,0	13,4	14,1	44,0	7,4	3,4	9,5	10,2	7,0
9	27,0	45,0	48,2	38,3	47,0	16,2		28,2		23,5
10	25,8	4,0	43,8			5,6	15,2			1,5
11	0,2			33,2		3,8				
12		4,2	1,1		55,2	1,1	19,0		8,5	3,2
13	35,6	37,2	48,4	54,1		31,2	5,5	4,0	48,2	31,0
14	23,7	23,1	13		33,2	22,6		3,7	6,2	38,3
15	15,4	28,3	30,9	20,0	30,2	41,0		9,1	22,5	5,2
16	6,1	30,2	5,0		7,6	15,4	15,0	139,5		65,0
17			4,4		12,2		21,0	1,0	38,5	10,0
18	12,5	12,0	0,5	31,3		15,0	14,0	6,6	7,2	41,0
19	47,3		1,9					3,7	5,3	5,0
20	8,3		0,1	18,4				1,6		0,2
21	17,7									
22	1,1	8,0	0,1		2,8	1,0				
23			0,6	33,2		1,2				
Saturation 20 au 25/2	31,4	70,1	83,8	115,7	129,0	41,0	0	73,4	33,7	102,2
Crue A Total du 26/2 au 5/3	74,7	147,6	160,1	136,4	77,2	80,4	203,0	165,3	150,8	164,0
Crue B Total du 6 au 23/3	262,2	214,2	216,0	344,9	252,2	176,0	115,6	206,9	149,1	232,9

Ces considérations, dégagées de l'étude des 2 crues de 1963, sont confirmées par l'examen des crues de 1924 à LAVRAS et 1960 à ICÓ. On en a déduit les caractères quantitatifs des phases pluvieuses et des crues résultantes (voir tableau n° 14). Les conditions d'apparition d'une forte crue deviennent :

- a) saturation préalable durant 5 à 10 jours et donnant 50 à 100 mm de hauteur d'eau --
- b) phase pluvieuse de 15 jours dépassant au total 200 mm sur un bassin de 2 à 10 000 km² avec des maximums ponctuels de 250 à 300 mm --
- c) présence au sein de cette phase d'un épisode intense de 4 à 5 jours au cours duquel tombent plus de 100 mm (150 mm ponctuels).

Pour connaître la probabilité d'apparition d'un tel ensemble, il faudrait pouvoir analyser statistiquement les types de temps susceptibles de les provoquer, ce qui est hors de notre atteinte actuellement.

En se restreignant au seul aspect pluviométrique du phénomène, l'absence de forme type de la phase pluvieuse conseillerait l'emploi de la méthode des intensités-durées-surfaces ; nous ne disposons pas encore, pour ce rapport sommaire, des éléments suffisants, c'est-à-dire des relevés journaliers à divers postes pluviométriques couvrant une aire nettement supérieure à celle du bassin d'ICÓ. Nous nous contenterons de rechercher l'épisode intense "maximum probable".

42 - HYÉTOGRAMME-ENVELOPPE de l'ÉPISODE PLUVIEUX INTENSE -

Bien que la majorité des épisodes intenses se manifestent au sein de phases pluvieuses intéressent une vaste région, leurs dates d'apparition et surtout les hauteurs de précipitation sont très variables d'un pluviomètre à l'autre. Nous admettrons donc possible l'emploi de la méthode des stations-années. Disposant d'environ 50 années de relevés journaliers aux 5 postes de CRATO, BREJO SANTO, MILAGRES, FARIAS BRITO et UMARI, nous pouvons constituer un hyétogramme-enveloppe des épisodes intenses de période de retour voisine de 250 ans.

TABLEAU N° 14

GRANDES PHASES PLUVIEUSES et CRUES RESULTANTES

Epoque	Bassin de LAVRAS			Bassin d'ICO		
	Avril 1924	1963 A	1963 B	Mars 1960	1963 A	1963 B
Pluie de saturation						
Durée en jours	10	5	(+)	5	5	(+)
Hauteur (mm)	120-150	30-130		50	30-130	
Phase pluvieuse	(++)					
Durée en jours	18 (4)	13 (5)	17 (7)	14 (6)	13 (5)	17 (7)
Maximum ponctuel (mm)	323	300 (171)	297 (164)	316 (152)	300 (171)	297 (164)
Hauteur moyenne (mm)	234	229 (109)	227 (119)	262 (134)	214 (114)	229 (121)
Abattement en %	72,5	76,5 (64)	76,5 (73)	83 (88)	77 (66)	76,5 (74)
Crue (+++)						
Durée en jours	17	16	22	20	16	22
Maximum journalier (m ³ /s)	1 440	1 070	470	1 280	1 040	1 300
Maximum horaire (m ³ /s)		1 170	575	1 460	1 100	1 440
Volume écoulé (10 ⁶ m ³)	1 035	256	148,5	587	477	680
Coefficient d'écoulement %	52	40	23,2	36	35,7	47,6

- (+) La crue B du 16 Mars 1963 succédant à celle du 2 Mars trouve des terrains déjà saturés -
- (++) Les chiffres entre parenthèses se rapportent à l'épisode intense responsable de la pointe de crue -
- (+++) Sauf pour 1924, les volumes et coefficients d'écoulement ont été calculés pour les seules zones cristallines des bassins -

En fait, une telle période de retour est insuffisante pour notre propos. Nous devons nous efforcer d'obtenir une enveloppe maximale du hyétogramme. Pour cela, la composition entre eux des hyétogrammes ponctuels observés d'épisodes pluvieux sera conduite afin de fournir le maximum de potentialité d'écoulement, tout en restant du domaine de la vraisemblance en matière de précipitations. Cette "maximisation" de l'épisode pluvieux a été réalisée à partir des 5 hyétogrammes ponctuels les plus dangereux que nous ayons trouvés dans les 250 stations-années, comme le montre le tableau suivant :

Lieu	Date	J	J+1	J+2	J+3	J+4	J+5	J+6	Total
MILAGRES	15-20 Mars	1924	76,8	62,7	23,4	3,4	68,2	17,3	251,8 mm.
FARIAS BRITO	12-17 Avril	1924	48,3	33,3	24,4	14,5	42,1	7,6	243,4 mm.
MILAGRES	21-24 Mars	1940	6,0	129,0	100,0	37,0			272,0 mm.
MILAGRES	5-11 Mars	1941	71,0	31,0	48,0	4,0	92,0	31,6	329,6 mm.
BREJO SANTO	17-20 Février	1961	6,2	135,2	43,5	10,0			194,9 mm.
Enveloppe			71	77	136	100	92	74	602 mm.

Les pluviomètres utilisés étant ceux de la partie la plus arrosée du bassin et même de tout le CEARÁ, on peut considérer le hyétogramme-enveloppe obtenu comme le maximum probable régional.

43 - CHOIX d'un MECANISME de TRANSFORMATION "PLUIE-ECOULEMENT" -

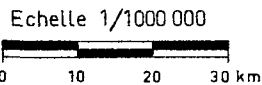
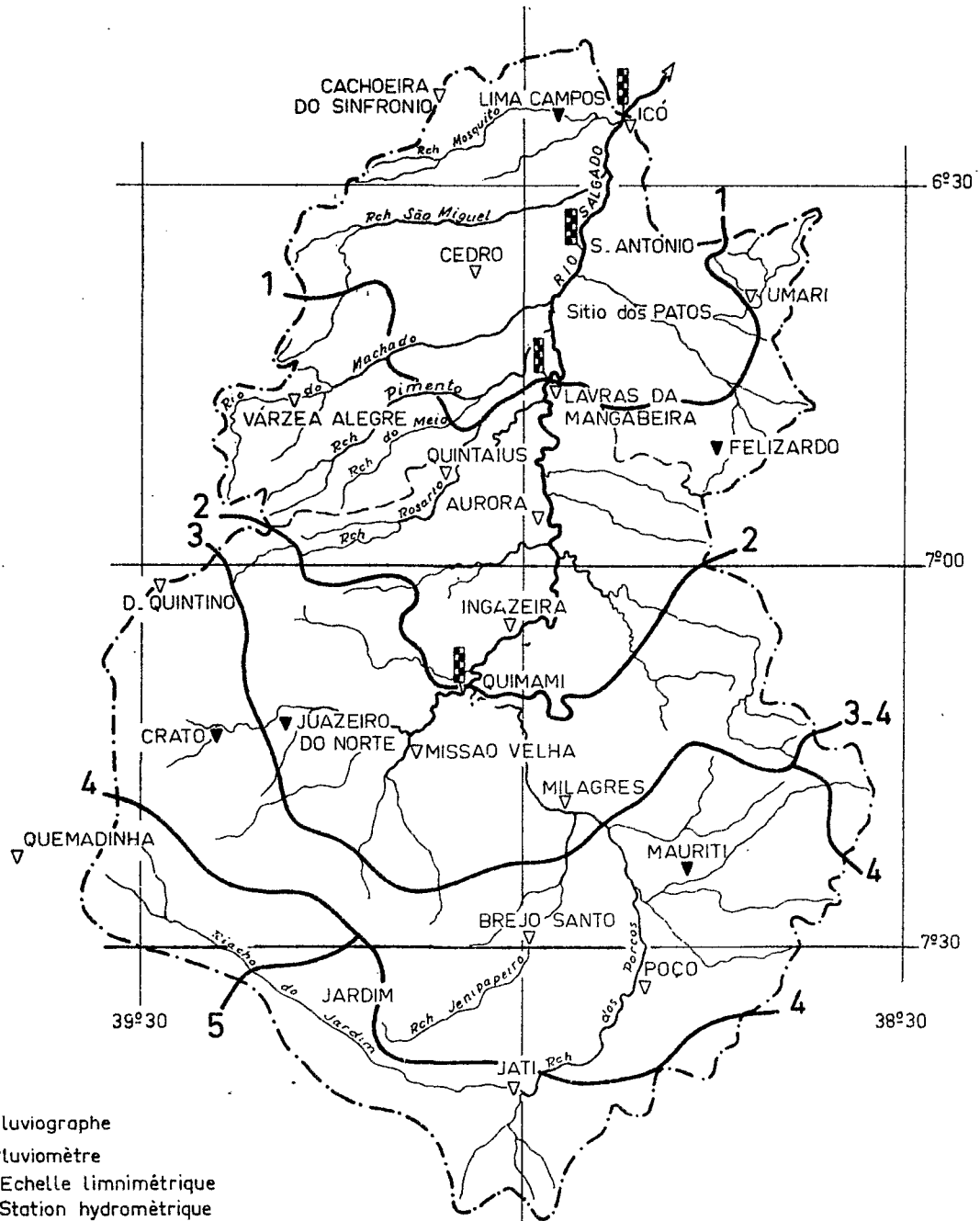
Ce mécanisme de transformation peut être précisé en reconstituant l'hydrogramme de crues observées à partir des précipitations ; cette reconstitution synthétique se ferait en appliquant la méthode des courbes isochrones qui sont le lien des points d'un bassin versant donné à partir desquels les gouttes de pluie mettent le même temps à s'écouler jusqu'à l'exutoire de ce bassin.

Avec des phases pluvieuses de 15 jours et des temps de base équivalents des hydrogrammes, une décomposition journalière paraît suffisante. En réalité, pour l'épisode intense, seul responsable de la pointe de crue, il faudrait pouvoir adopter un temps de décomposition de 6 heures car le temps de concentration (durée maximale de parcours des gouttes de pluie ruisselant sur un bassin) pour les bassins de LAVRAS et d'ICÓ, est limité à 5 et 6 jours et seulement à 2 et 3 jours pour les seules zones cristallines. Ces temps de concentration ont été déterminés en étudiant des crues courtes et simples et précisés lors de la reconstitution des fortes crues.

Une décomposition en courbes isochrones équidistantes de 6 heures exigerait une connaissance exacte des heures de précipitations en tous lieux ; or, nous n'avons en 1963 que les pluviographes de FELIZARDO et VARZEA ALEGRE, ce qui est manifestement insuffisant. Nous adopterons donc un découpage des bassins versants en courbes isochrones à équidistance journalière, en sachant que ce procédé grossier permettra seulement la reconstitution fidèle de l'ensemble de la crue mais non celle de sa forme jour par jour et qu'en conséquence, la connaissance du débit maximal de pointe ne pourra être très précise.

On trouvera, sur le graphique n° 14, une carte schématique du bassin du rio SALGADO avec tracé des courbes isochrones journalières numérotées de 1 à 6 et correspondant à des durées de parcours des eaux s'écoulant de la ligne à ICÓ, égales à 1,2 ... 6 jours. Le temps de parcours étant voisin de 24 heures entre LAVRAS et ICÓ, les durées pour le bassin de LAVRAS s'obtiennent en retranchant 1 jour au numéro de la courbe. Ces courbes ont été tracées après examen des crues, en tenant compte de la forme du réseau hydrographique et de la pente des terrains. Elles délimitent entre elles des bandes isochrones 0-1, 1-2, 2-3, etc ... pour lesquelles la durée moyenne de parcours est donc de 1/2, 1 1/2, 2 1/2 journées, etc ...

On a rassemblé, sur le tableau suivant, les superficies de ces bandes isochrones en valeur totale et relativement à l'ensemble de chaque bassin considéré, distinction étant faite des secteurs sédimentaires et cristallins.



Bandes isochrones : (par rapport à ICO)	Bassin d'ICÓ			Bassin de LAVRAS		
	km ²	% total	% cristall.	km ²	% total	% cristall.
0-1 C	2 215	18,5	36			
1-2 C	2 900	24,5	46	1 675	20	60
2-3 C	1 120	9,5	18	1 120	13	40
2-3 S	1 200	10		1 200	14	
3-4 S	3 120	26		3 120	36	
4-5 S	890	7,5		890	11	
5-6 S	475	4		475	6	

On a reconstitué, pour les seules zones cristallines, les hydrogrammes des crues A et B de 1963 de la façon suivante :

Nous avons déjà dit que les hauteurs moyennes de précipitation journalière ont été calculées pour chaque bande isochrone à partir des données d'observations ponctuelles. Chaque moyenne a été pondérée par application du coefficient représentant la part relative de chaque bande vis-à-vis du bassin total.

Ces moyennes pondérées, multipliées par un coefficient d'écoulement, conduisent aux lames écoulées qui sont ensuite additionnées jour par jour, au fur et à mesure de leur arrivée à la station (LAVRAS ou ICÓ), selon leur durée de parcours. On obtient ainsi l'hydrogramme synthétique brut de la crue.

Les coefficients d'écoulement varient avec la hauteur de la pluie et l'état de saturation du terrain ; leurs valeurs ont été déterminées par tâtonnements afin d'obtenir un volume écoulé de l'hydrogramme brut synthétique égal à celui de la crue observée. On a dressé un abaque (Gr. n° 15) représentant les variations les plus plausibles de K_e pour les terrains cristallins en fonction de la hauteur de la pluie ; l'état de saturation

ORSTOM

A0

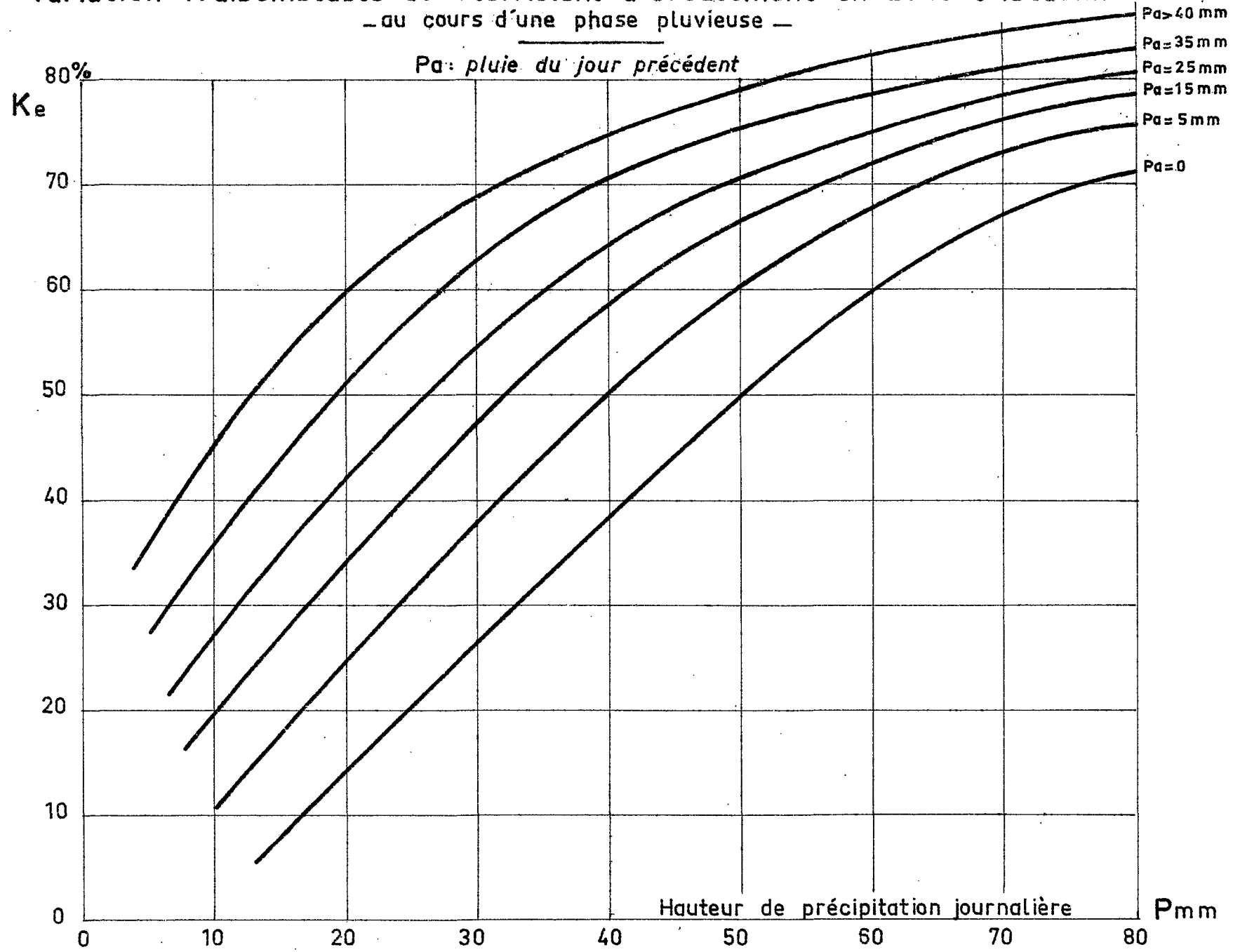
DATE: s. ca

DESSINÉ: G. MARTIN

ETR-291201

Variation vraisemblable du coefficient d'écoulement en zone cristalline — au cours d'une phase pluvieuse —

P_a : pluie du jour précédent



Gr.15

pouvant être tout simplement représenté par la hauteur d'eau reçue le jour précédent, puisqu'un état général de bonne saturation préalable des terrains est sensé exister du fait que nous n'envisageons que des précipitations au sein d'une phase pluvieuse.

L'hydrogramme brut ainsi obtenu doit être modulé pour tenir compte des modifications que subissent les ondes de crue au cours de leur cheminement dans les thalwegs principaux. Nous avons simplifié à l'extrême les formules d'hydraulique relatives à cette modulation, en suivant le raisonnement simplifié que voici :

- l'onde de crue journalière en provenance d'une bande isochrone quelconque et représentée dans l'hydrogramme synthétique brut par une lame écoulée L qui est sensée arriver le jour J à la station de contrôle, subit un certain retard, de telle sorte qu'elle s'étale sur plusieurs jours au cours desquels n'arrive à l'exutoire qu'un certain pourcentage de ladite lame L. La modulation varie selon que nous sommes en phase de montée ou de descente de l'hydrogramme et suivant le débit transitant dans le lit.

L'analyse des crues de 1963 a permis de chiffrer cette modulation :

Phase	jour J	J+1	J+2
Montée ($Q < 500 \text{ m}^3/\text{s}$)	60 %	30 %	10 % de la lame L
Montée ($Q > 500 \text{ m}^3/\text{s}$)	30 %	60 %	10 % de la lame L
Descente	30 %	30 %	40 % de la lame L

Cette modulation de l'hydrogramme brut donne l'hydrogramme synthétique de la zone cristalline auquel on ajoute, avec un délai de parcours de 24 h. pour LAVRAS et 48 h. pour ICÓ, l'hydrogramme observé sur le haut SALGADO pour avoir la crue totale reconstituée. Les résultats sont satisfaisants, surtout à ICÓ, et sont confirmés par des essais comparables effectués pour les crues de 1924 et 1960.

Le mécanisme de transformation pluie-écoulement ainsi constitué peut être appliqué au hyétogramme-enveloppe pour déterminer la crue maximale probable.

44 - DETERMINATION de la CRUE MAXIMALE PROBABLE -

Le hyétogramme-enveloppe ponctuel a été affecté de coefficients d'abattement respectivement égaux à 0,70 et 0,75 pour les bassins d'ICÓ et de LAVRAS.

Le hyétogramme moyen ainsi obtenu a été transformé en hydrogramme par application du mécanisme déterminé ci-dessus. On a considéré que la modulation de l'hydrogramme brut devait être très amortie à partir du moment où les débits excèdent 2 000 m³/s dans le lit principal et nous avons adopté alors un schéma de modulation, non plus sur 3 mais sur 5 jours. Ceci a été fait en supposant réduits au minimum les débordements, ce qui est certainement assez sévère, le lit majeur existant n'étant peut-être pas apte à véhiculer des débits supérieurs à 3 000 m³/s, mais nous restons ainsi dans l'optique d'une recherche de l'évènement maximal probable.

En ce qui concerne l'apport des terrains sédimentaires, on a choisi un coefficient d'écoulement de 15 % (10 % en 1963), ce qui donne un volume de 340 millions de m³, triple de celui de chaque crue de Mars 1963. On a adopté un hydrogramme déduit de celui de 1963 par affinité ($K = 3$).

On trouvera, dans le tableau n° 15, la succession des débits moyens journaliers sur le haut SALGADO, à LAVRAS et à ICÓ et la formation des hydrogrammes synthétiques par composition du premier décalé de 24 et 48 h. avec les 2 autres.

Les résultats globaux de cette reconstitution sont rassemblés ci-après :

	<u>L A V R A S</u>	<u>I C O</u>
Hyétoqramme moyen (mm)	453	422
- <u>Zone cristalline</u>		
Lame écoulee (mm)	355	325
Ke ‰	78,5	77
Volume écoulé ($10^6 m^3$)	990	2 020
- <u>Bassin total</u>		
Volume écoulé ($10^6 m^3$)	1 330	2 360
Ke ‰	35	47,5
- <u>Zone cristalline</u>		
Débits maximaux (m^3/s)	2 550	3 500
Débits spécifiques ($l/s.km^2$)	900	560
- <u>Bassin total</u>		
Débits maximaux (m^3/s)	2 670	3 620
Débits spécifiques ($l/s.km^2$)	315	300

En supposant que les débits maximaux horaires sont supérieurs, aux débits maximaux moyens journaliers de 15 ‰ à LAVRAS et de 10 ‰ à ICO, on peut les estimer respectivement à 3 100 et 4 000 m^3/s .

Enfin, il faut admettre que cet épisode intense exceptionnel survient à l'intérieur d'une phase pluvieuse. Par analogie avec les phases étudiées, on peut supposer que la phase exceptionnelle correspondrait à environ 1 400 mm de hauteur maximale ponctuelle de précipitations en 25 à 30 jours. Sans préjuger de sa forme, on peut cependant estimer que la totalité du volume écoulé en 30 à 35 jours serait double de celui de l'épisode intense, soit environ 2,3 milliards de m^3 à LAVRAS et 4,3 milliards de m^3 à ICO.

TABLEAU N° 15

HYDROGRAMME de la CRUE MAXIMALE PROBABLE

(Débits moyens journaliers en m³/s)

: Jours :	: Bassin de LAVRAS :		: Bassin d'ICÓ :	
	: Haut SALGADO :	: Z. cristall. : Total :	: Z. cristall. : Total :	
: J+1 :	: 25 :	: 405 : 405 :	: 310 : 310 :	
: J+2 :	: 90 :	: 1 090 : 1 115 :	: 1 220 : 1 220 :	
: J+3 :	: 120 :	: 1 580 : 1 670 :	: 2 500 : 2 525 :	
: J+4 :	: 150 :	: 2 550 : <u>2 670</u> :	: 3 040 : 3 130 :	
: J+5 :	: 120 :	: 2 400 : 2 550 :	: 3 040 : 3 160 :	
: J+6 :	: 120 :	: 1 660 : 1 780 :	: 3 300 : 3 450 :	
: J+7 :	: 120 :	: 1 240 : 1 360 :	: 3 500 : <u>3 620</u> :	
: J+8 :	: 250 :	: 500 : 620 :	: 2 850 : 2 970 :	
: J+9 :	: 275 :	: 70 : 320 :	: 1 860 : 1 980 :	
: J+10 :	: 370 :	: : 275 :	: 1 015 : 1 265 :	
: J+11 :	: 435 :	: : :	: 480 : 755 :	
: J+12 :	: 390 :	: : :	: 160 : 530 :	
: J+13 :	: 360 :	: : :	: 30 : 465 :	

45 - ANALYSE STATISTIQUE des PLUS FORTES CRUES OBSERVEES -

Une telle analyse n'est concevable que pour la station de LAVRAS-PATOS dotée de 41 ans de relevés. Après plusieurs tentatives effectuées sur la série des maximums annuels, nous avons constaté que la disproportion y était excessive (valeurs extrêmes 20 et 1 440 m³/s) et que de nombreuses crues importantes n'étaient pas prises en compte.

En effet, la structure du bassin et le régime des crues que nous venons d'examiner permettent de considérer que la plupart des crues survenant au cours d'une même année étaient indépendantes entre elles et que nous avons tout intérêt à utiliser ce supplément d'information. Nous avons donc sélectionné, suivant des critères sévères, toutes les crues indépendantes des 41 années observées, en nous interdisant de descendre en dessous de 200 m³/s pour 2 raisons :

- toute pointe de débit inférieur ne peut guère être considérée comme une crue au sens complet de ce terme,
- la mobilité des étalonnages affecte seulement les débits inférieurs à 200 m³/s.

Nous avons recueilli 52 crues représentées par leur débit moyen journalier maximal. Cet échantillon de 52 valeurs présente une certaine discontinuité due au fait que la majorité des débits résultent de lectures d'échelles graduées de 10 en 10 ou de 20 en 20 centimètres. Nous avons rapidement constaté que cela provoquait une contrainte mal définissable dans le choix des limites de classes lorsque nous voulions contrôler la validité d'ajustement d'une loi de probabilité par application du critère du χ^2 de PEARSON.

Dispersion au hasard de l'échantillon des fortes crues à LAVRAS-PATOS :

Il nous est rapidement apparu nécessaire d'essayer de rendre à cet échantillon une dispersion plus naturelle. Nous avons appliqué la méthode suivante .

Chaque débit maximal moyen journalier a été calculé à partir d'une hauteur moyenne journalière H_0 lue à l'échelle ; cette hauteur est soit approchée, soit exacte, au centimètre près, selon les périodes ; la vraie hauteur H qui aurait été lue si l'échelle avait été graduée de

centimètre en centimètre occupe une position au hasard dans un intervalle donné autour de la lecture H_0 :

$$\begin{array}{lll} H_0 - 10 \leq H \leq H_0 + 10 & \text{à LAVRAS de 1911 à 1930} \\ H_0 - 5 \leq H \leq H_0 + 5 & \text{à PATOS de 1936 à 1960} \\ H = H_0 & \text{à LAVRAS de 1961 à 1963} \end{array}$$

Les inégalités peuvent s'écrire différemment en mettant en évidence la valeur minimale possible de la vraie lecture et l'écart maximal de variation :

$$\begin{array}{lll} (H_0 - 10) \leq H \leq (H_0 - 10) + 20 & \text{à LAVRAS de 1911 à 1930} \\ (H_0 - 5) \leq H \leq (H_0 - 5) + 10 & \text{à PATOS de 1936 à 1960} \end{array}$$

Pour s'approcher de la dispersion naturelle de l'échantillon des 52 valeurs de H_0 , on prendra, pour chacune des 47 valeurs non exactement observées (5 valeurs entre 1961 et 1963 étant exactement connues), la valeur minimale possible de la vraie lecture H , soit $(H_0 - 5)$, soit $(H_0 - 10)$ et on lui ajoutera un nombre au hasard compris entre 0 et 10 ou 0 et 20, suivant la période. Ce nombre au hasard a été obtenu par prélèvement dans une table de "nombres au hasard" spécialement établie à cet effet (FISHER et YATES) et dont la distribution statistique est uniforme (densité de probabilité constante). On a prélevé les chiffres par couples ; ces couples pouvant varier de 00 à 99 sont divisés par 10 (et multipliés par 2 pour la série de LAVRAS) puis le résultat, arrondi à l'unité la plus proche et qui peut varier de 0 à 10 ou à 20, est ajouté à la valeur minimale déterminée ci-dessus : $(H_0 - 5)$ ou $(H_0 - 10)$.

A partir des nouvelles valeurs redispersées au hasard des hauteurs moyennes journalières, on a calculé les nouvelles valeurs des 52 débits de crues indépendantes que l'on trouvera classées au dépassement avec leur rang, leur fréquence expérimentale et leur date d'apparition dans le tableau n° 16.

Ajustement d'une loi de GOODRICH aux débits maximaux de LAVRAS-PATOS :

Le report sur un graphique (n° 16) à échelle gausso-normale des 52 débits maximaux ainsi obtenus, montre que l'échantillon doit suivre une loi de probabilité de forme exponentielle. De fait, la plupart des lois classiques (GALTON, GUMBEL, PEARSON III) semblent susceptibles de convenir ; nous leur avons préféré celle de GOODRICH dont l'ajustement aux valeurs fortes, celles qui nous intéressent, paraissait mieux en accord avec les données expérimentales.

TABLEAU N° 16

DEBITS MAXIMAUX MOYENS JOURNALIERS à LAVRAS-PATOS
(en m³/s) après REDISPERSION au HASARD

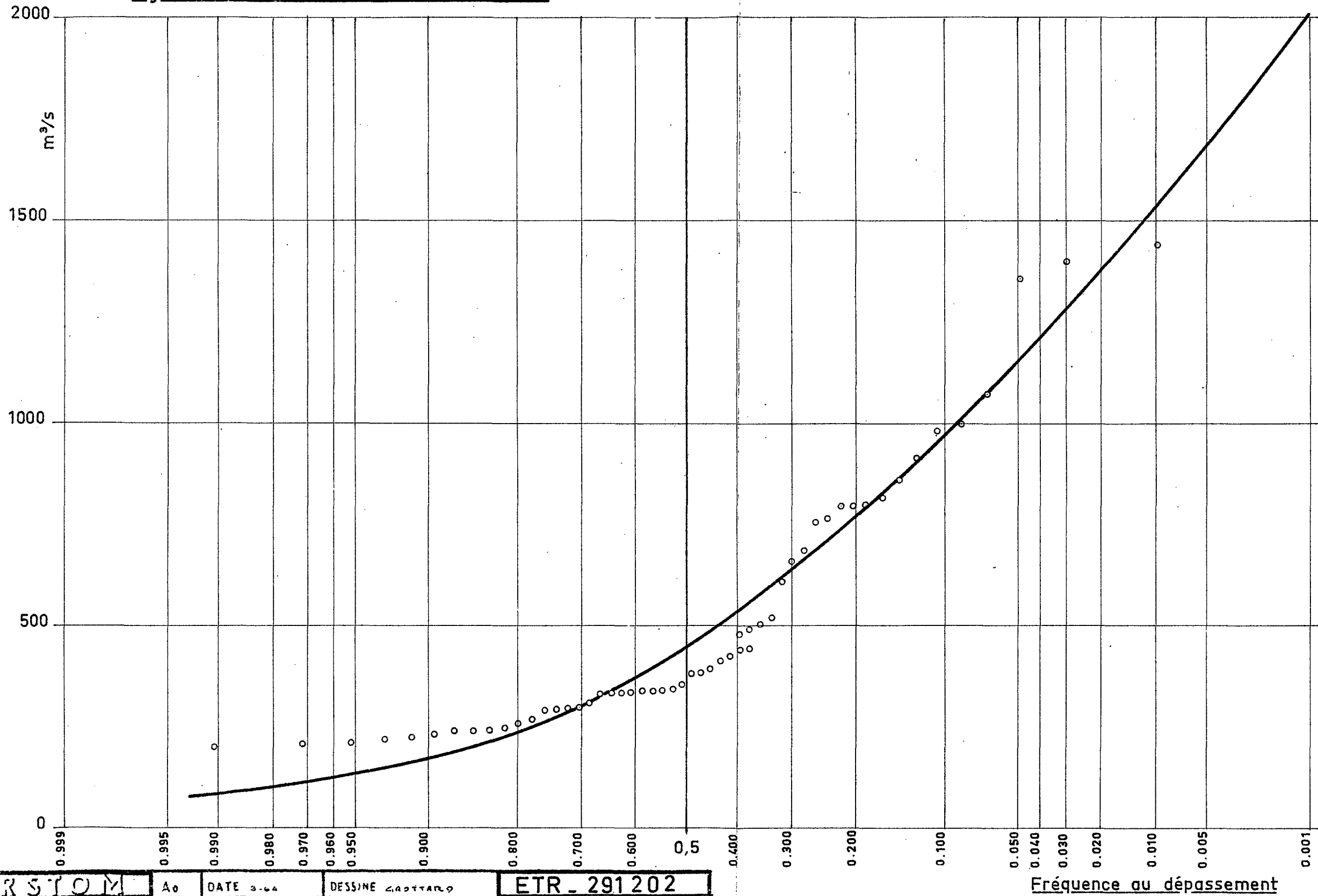
Date	Rang	Fréquence	Débit
18/4/1924	1	0,0096	1 440
29/3/1947	2	0,029	1 400
10/3/1913	3	0,048	1 357
3/3/1963	4	0,067	1 072
25/3/1955	5	0,086	998
29/4/1940	6	0,106	982
24/3/1960	7	0,125	914
3/4/1937	8	0,144	861
19/2/1956	9	0,163	819
11/4/1955	10	0,183	800
16/4/1949	11	0,202	796
20/4/1950	12	0,221	796
22/3/1925	13	0,240	766
8/3/1937	14	0,259	757
27/3/1940	15	0,278	688
2/3/1937	16	0,298	660
16/2/1924	17	0,317	610
30/3/1943	18	0,336	521
13/4/1925	19	0,356	506
20/3/1924	20	0,375	486
17/3/1963	21	0,394	483
4/4/1928	22	0,414	424
25/4/1957	23	0,433	414
12/3/1926	24	0,452	396
7/5/1945	25	0,471	388
18/2/1913	26	0,490	382
31/3/1957	27	0,509	357
12/3/1956	28	0,528	347
17/3/1959	29	0,547	342
26/3/1956	30	0,567	340
9/3/1941	31	0,586	340
24/2/1963	32	0,606	338

TABLEAU N° 16 (suite)

Date	Rang	Fréquence	Débit
23/2/1947	33	0,625	336
11/3/1925	34	0,644	334
3/3/1955	35	0,663	332
23/4/1922	36	0,683	310
28/3/1958	37	0,702	298
19/4/1956	38	0,721	296
27/2/1939	39	0,740	292
29/3/1961	40	0,759	292
6/4/1924	41	0,779	270
18/2/1939	42	0,798	258
6/2/1924	43	0,817	248
21/2/1961	44	0,836	242
16/2/1923	45	0,855	239
7/5/1925	46	0,875	239
12/3/1928	47	0,894	231
12/3/1960	48	0,913	226
11/2/1945	49	0,932	219
15/3/1940	50	0,952	210
4/4/1944	51	0,971	208
24/5/1923	52	0,990	201

Débits maximaux moyens journaliers
supérieurs à 200m³/s

Ajustement d'une loi de GOODRICH



ORSTOM

A0 DATE 3-64

DESSINE GADTAR9

ETR - 291202

Fréquence au dépassement

Dans cette loi, la probabilité au dépassement est de la forme :

$$F_1(q) = e^{-A (q - q_0) \frac{1}{n}}$$

dans laquelle q est une valeur quelconque du débit de crue et A , q_0 et n les 3 paramètres d'ajustement. Nous avons déterminé ces paramètres en utilisant des estimateurs calculés à partir :

- de la moyenne de l'échantillon $\bar{q} = \frac{1}{N} \sum q_i = 520$

- de la variance de l'échantillon $\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum (q_i - \bar{q})^2 = 106\ 683$

- du moment de 3ème ordre de l'échantillon $\mu_3 = \frac{N}{(N-1)(N-2)} \sum (q_i - \bar{q})^3 = 45\ 654\ 383$

Sans entrer dans le détail théorique des calculs (*), nous donnons directement les résultats de ces estimations : $n = 0,706$, $q_0 = 64$ et $A = 1,497 \cdot 10^{-4}$

La loi de GOODRICH ainsi ajustée s'écrit :

$$F_1(q) = e^{-1,497 \cdot 10^{-4} (q-64) \frac{1}{0,706}}$$

ou bien encore, suivant que l'on cherche les fréquences pour un débit connu ou vice et versa, en passant aux logarithmes :

$$\log (q-64) = 2,955 + 0,706 \log [-\log F_1(q)] \quad (1)$$

$$\log [-\log F_1(q)] = 1,416 \log (q-64) - 4,187 \quad (2)$$

(*) M. ROCHE - Hydrologie de surface - pages 38 et 303.

La validité de l'ajustement a été contrôlée par application du test du χ^2 de PEARSON :

$$\chi^2 = \sum \frac{(n_i^i - n_i)^2}{n_i^i}$$

dans lequel n_i^i est le nombre théorique de valeurs et n_i le nombre observé dans une classe donnée de l'échantillon. On trouvera le détail de ce test dans le tableau suivant, où n_i^i est calculé à partir de la formule (2).

: N° de classe	: Limites de classes	: n_i^i	: n_i	: $\frac{(n_i^i - n_i)^2}{n_i^i}$
: 1	: < 240	: 9,5	: 8	: 0,24
: 2	: 240-299	: 5,3	: 8	: 1,37
: 3	: 299-381	: 6,2	: 10	: 2,33
: 4	: 381-600	: 13,0	: 9	: 1,23
: 5	: 600-767	: 7,6	: 5	: 0,89
: 6	: 767-968	: 5,2	: 6	: 0,12
: 7	: > 968	: 5,2	: 6	: 0,12

$\chi^2 = 6,30$ avec un nombre de degrés de liberté égal à : $7-1-3$ soit 3 (il y a 3 paramètres dans la loi). La probabilité est égale à 10 %, donc satisfaisante pour justifier l'ajustement.

La formule (1) permet de calculer les valeurs du débit maximal pour diverses périodes de retour. On notera que la série de 52 valeurs étant obtenue à partir de 41 ans de relevés, le rang 4,1 est celui de la période de retour de 10 ans, 0,41 celui de 100 ans, etc ... et que les fréquences correspondantes s'en déduisent par division de r par $N = 52$.

La longueur de la série permet seulement de connaître avec précision les débits jusqu'à une période de retour voisine de $2N$, soit environ 100 ans ; on a cependant calculé les débits plus rares à titre d'information :

Période de retour	Débit en m ³ /s	Débit spécifique en l/s.km ²	
		Bassin total	Bassin cristall.
10 ans	1 090	130	355
100 "	1 590	188	530
500 "	1 925	227	650
1 000 "	2 100	250	715
10 000 "	2 500	295	860

Les débits spécifiques, rapportés au bassin limité à la zone cristalline, ont été déterminés en supposant égale à 100 m³/s la part de la zone sédimentaire (estimation grossière).

Ces résultats sont en harmonie avec le débit moyen journalier de la crue maximale probable, estimé à 2 670 m³/s.

Les fortes crues à ICÓ :

Il est impossible d'en faire une analyse statistique. On n'y dispose en effet que de 7 années de relevés au cours desquelles furent observées 15 crues indépendantes supérieures à 200 m³/s, dont la liste est donnée ci-après :

Rang	Date	Débit maximal moyen journalier (en m ³ /s)
1	25/3/60	1 458
2	15/3/63	1 446
3	2/3/63	1 100
4	3/3/60	612
5	12/4/61	554
6	16/3/60	525
7	12/3/57	460
8	18/4/57	430
9	5/2/63	398
10	1/4/62	297
11	6/4/57	274
12	20/3/62	256
13	1/3/59	252
14	1/3/58	252
15	22/2/61	222

Les débits de la période 1957-60 sont approximatifs, les relevés d'échelles étant faits à ± 5 cm près.

D'autre part, il n'existe qu'une corrélation très lâche entre les débits de crue à LAVRAS-PATOS et à ICÓ, incapable de permettre l'utilisation des résultats de l'étude de la 1ère série pour calculer les débits à ICÓ correspondant à diverses périodes de retour.

A titre purement indicatif et sans pouvoir accorder une grande confiance au procédé, nous avons estimé ces débits par analogie avec les résultats de LAVRAS et ceux obtenus par HIDROSERVICE à OROS (environ 26 700 km²).

Période de retour	Débit en m ³ /s	Débit spécifique en l/s.km ²	
		Bassin total	Bassin cristall.
10 ans	1 300	110	190
100 "	2 050	170	315
500 "	2 600	220	400
1 000 "	2 900	245	450
10 000 "	3 300	275	515

CONCLUSION

Les résultats présentés dans cette étude sommaire du régime hydrologique du rio SALGADO en fournissent un premier cliché satisfaisant.

Cependant, nous avons dû, chemin faisant, opter pour des méthodes simplifiées d'analyses par suite du manque actuel de documents élaborés couvrant l'ensemble du bassin du JAGUARIBE. La précision de nos résultats en a certainement été affectée.

Il s'avère donc souhaitable de reprendre les diverses études :

- régime des précipitations journalières
- régime des hauteurs annuelles de précipitations
- modules annuels
- crues exceptionnelles,

et tout particulièrement, dans un cadre plus vaste, ce qui sera possible à l'occasion de la rédaction de la monographie hydrologique du JAGUARIBE, par exemple.

Les observations poursuivies en 1964 par la Section Hydrologique du GEVJ doivent, en outre, permettre de réviser - ou d'améliorer - certaines données ou interprétations :

- extrapolation en hautes eaux des courbes d'étalonnage
- choix d'étalonnages variables avec les fonds de lit
- extension temporelle des corrélations hydropluviométriques, etc

Enfin, les points abordés dans cette étude sommaire ne peuvent prétendre couvrir l'ensemble du domaine hydrologique. En fonction des besoins des responsables des aménagements hydrauliques, d'autres domaines, comme ceux des débits moyens mensuels et de leur répartition interannuelle, pourraient être explorés.

PRINCIPAUX DOCUMENTS CONSULTES

- M. ROCHE "Hydrologie de Surface" - Gauthier-Villars éditeur, PARIS-1963.
- FISHER and YATES "Statistical Tables for biological agricultural and medical research" - Oliver and Boyd, éditeur à LONDRES.
- HIDROSERVICE "Hidrologia da bacia do JAGUARIBE - Atividades hidrométricas e treinamento pessoal" 1960-61 - SUDENE - RECIFE.
- HIDROSERVICE "Estudo hidrológico das possibilidades de aproveitamento do açude de ORÓS" DNOCS, RIO 1962.
- SUDENE-DNOCS - Grupo executivo misto de hidrologia "Relatorio sobre as atividades fluviométricas do ano de 1962" - RECIFE.
- Groupe d'Etudes du Val JAGUARIBE "Rapport préliminaire" - RECIFE - Mars 1963.
- G.E.V.J. "Les bassins expérimentaux du CARIRI - Rapport préliminaire sur la campagne 1963" - ORSTOM, PARIS - Janvier 1964.
- Archives pluviométriques et hydrométriques du GEVJ (Origines DNOCS et SUDENE).

