

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
ET TECHNIQUE OUTRE-MER

MISSION D'AMÉNAGEMENT  
DU FLEUVE SÉNÉGAL

# MONOGRAPHIE HYDROLOGIQUE DU FLEUVE SÉNÉGAL



## 3<sup>ème</sup> PARTIE ANALYSE DES ÉLÉMENTS DU RÉGIME HYDROLOGIQUE

par  
C. ROCHETTE  
Ingénieur hydrologue E.D.F.

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
ET TECHNIQUE OUTRE-MER

-----

MISSION D'AMENAGEMENT  
DU FLEUVE SENEGAL

-----

MONOGRAPHIE HYDROLOGIQUE  
DU FLEUVE SENEGAL

-----

3ème PARTIE

ANALYSE DES ELEMENTS DU REGIME HYDROLOGIQUE

---

par

C. ROCHETTE

Ingénieur hydrologue E.D.F.

Juillet 1967

## S O M M A I R E

	Page
<u>CHAPITRE I - REGIME des HAUTEURS LIMNIMETRIQUES</u>	1
1.1. - DESCRIPTION GENERALE	1
1.2. - ETUDE des CRUES et de leur PROPAGATION	3
1.2.1. Amplitude de la crue	3
1.2.2. Date du maximum de la crue	4
1.2.3. Vitesse de propagation	5
1.2.4. Corrélations entre les hauteurs maximales annuelles aux différentes stations	14
1.2.5. Etude statistique des hauteurs maximales annuelles	18
1.3. - ETUDE des ETIAGES	27
1.3.1. Courbes de tarissement	27
1.3.2. Etiage absolu	28
1.4. - HAUTEURS CARACTERISTIQUES	31
1.5. - DIAGRAMME ANNUEL des HAUTEURS d'EAU JOURNALIERES de DIVERSES FREQUENCES	54
1.6. - PROBABILITE LIEE à la DATE à LAQUELLE une HAUTEUR DONNEE est ATTEINTE	54
 <u>CHAPITRE II - REGIME des DEBITS</u>	 57
2.1. - GENERALITES	57
2.2. - ETUDE des MODULES	58
2.2.1. Stations du SENEGAL moyen	58
2.2.2. Stations du BAKOYE	61
2.2.3. Stations du BAFING	63
2.2.4. Stations de la FALEME	64
2.2.5. Stations de la Vallée	66
2.2.6. Comparaison des modules aux stations principales du Haut Bassin	67
2.2.7. Comparaisons des modules à BAKEL et à DAGANA	69

	Page
2.3. - ETUDE des DEBITS MAXIMAUX ANNUELS	69
2.3.1. Le SENEGAL à GALOUGO (ou GOUINA)	70
2.3.2. Le SENEGAL à KAYES	70
2.3.3. La FALEME à KIDIRA	71
2.3.4. Le SENEGAL à BAKEL	73
2.3.5. Le SENEGAL à MATAM	75
2.3.6. Le SENEGAL à DAGANA	76
2.4. - VOLUMES STOCKES dans le LIT MAJEUR	77
2.5. - ETUDE du TARISSEMENT	80
2.5.1. Généralités	80
2.5.2. Coefficients de tarissement	82
2.5.3. Capacité de rétention	85
2.5.4. Relation tarissement-propagation	89
<u>CHAPITRE III - PROPAGATION de la MAREE - REMONTEE CYCLIQUE</u> <u>des EAUX MARINES</u>	93
3.1. - CARACTERISTIQUES RELATIVES à la MAREE et à sa PROPAGATION	93
3.1.1. Marée à l'embouchure	94
3.1.2. Propagation de la marée	94
3.1.3. Niveau moyen	95
3.2. - REGIME HYDRAULIQUE dans le BIEF MARITIME	97
3.3. - EVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE de la SALINITE	98
3.3.1. Caractères généraux de la répartition spatiale de la salinité	98
3.3.2. Evolution de la salinité au cours d'une période de marée	99
3.3.3. Variations cycliques bimensuelles de la salinité	99
3.4. - REPRESENTATION GRAPHIQUE de l'EVOLUTION de la SALINITE - ETABLISSEMENT de la RELATION SALINITE- DEBIT FLUVIAL	100
3.5. - RETRAIT de la SALURE	102
3.6. - ETUDE STATISTIQUE de l'ABSCISSE MAXIMALE AT- TEINTE par l'EAU SALEE et du RETRAIT de la SALURE	104

Les données qui ont été rassemblées sur l'Hydrologie du SENEGAL ont fait l'objet d'une étude critique très approfondie. On s'est efforcé, dans l'interprétation qui va suivre, de procéder à une analyse aussi complète que possible afin que les ingénieurs chargés d'utiliser les eaux du fleuve y trouvent, dans la mesure du possible, tous les renseignements dont ils auront besoin. Malheureusement de graves lacunes subsistent.

Dans ce qui suit, on ne trouvera pratiquement aucune évaluation des débits spécifiques en  $l/s.km^2$ . La raison en est la suivante : à l'aval de GOUINA, une partie importante du bassin est presque endoréique, de sorte qu'une moyenne estimée sur la totalité de la superficie du bassin versant n'a aucune signification ; à l'amont du SENEGAL, de BAFOULABE à GOUINA et pour le BAKOYE, le bassin versant présente des variations très importantes concernant le régime hydrologique, de sorte que là encore les débits spécifiques moyens n'auraient pas grande signification. En définitive, il ne reste guère que la FALEME et le BAFING pour lesquels des débits spécifiques pourraient être intéressants, mais là le petit nombre de stations, la qualité médiocre de leur étalonnage, enlèvent beaucoup d'intérêt à cette notion de débit spécifique, c'est pourquoi ces débits n'ont pas été évalués dans la présente Monographie.

On ne trouvera pas non plus de bilan hydrologique, ni d'évaluation du déficit d'écoulement. Pour ce genre d'études, l'existence de zones à régime sahélien et l'hétérogénéité des régimes, constituent déjà un obstacle. En outre, la densité des postes pluviométriques est beaucoup trop faible et la qualité des lectures trop médiocre pour que l'on puisse procéder à une estimation valable.

Enfin, pour les mêmes raisons, il n'a pas été procédé à des études de corrélation hydro-pluviométriques, ceci d'autant plus que la durée des périodes d'observations des postes pluviométriques est inférieure à la durée des observations aux stations de jaugeages les plus anciennes.

Rien n'a été indiqué en ce qui concerne les débits solides puisque le nombre de prélèvements a été insignifiant. Rien non plus en ce qui concerne la salinité des eaux sur le SENEGAL Moyen et sur le bassin supérieur, on sait d'ailleurs que ces eaux sont très douces (moins de 100 milligrammes de matières dissoutes par litre).

## CHAPITRE I

### REGIME DES HAUTEURS LIMNIMETRIQUES

#### I - 1 - DESCRIPTION GENERALE

Nous nous intéresserons surtout dans ce chapitre aux stations de la Vallée où la connaissance du régime des hauteurs limnimétriques présente une importance particulière pour tous les problèmes que posent la navigation, l'aménagement agricole des zones inondées, la construction de routes ou la protection des agglomérations contre les crues. Ces problèmes n'existent pour ainsi dire pas dans le HAUT-BASSIN.

Certaines études se rapportant à la fois au régime des hauteurs limnimétriques et au régime des débits (date des maximums, temps de propagation des crues) sont traitées dans ce chapitre et c'est surtout pour ces études non spécifiquement liées au régime des hauteurs que nous présenterons des caractéristiques portant sur la totalité du bassin.

Etant donné que ce chapitre concerne assez peu les stations du HAUT-BASSIN, nous avons préféré reporter la description du régime du SENEGAL en amont de BAKEL, au chapitre consacré à l'étude des débits et nous limiter pour l'instant à la description du régime de la Vallée.

Le régime de la Vallée est d'un type tropical assez pur ; il est, dans ses grandes lignes, très simple et se caractérise essentiellement par :

- une saison de hautes eaux de Juin-Juillet à Octobre-Novembre.
- une saison de basses eaux, à décroissance très régulière, de Novembre-Décembre à Mai-Juin.

Ces traits généraux se conservent dans toute la Vallée et le delta du SENEGAL, mais on note cependant une modification progressive de l'amont vers l'aval, due aux

vastes débordements qui affectent le lit majeur. En descendant le cours du fleuve, l'évolution de la crue annuelle se fait plus progressive, ses irrégularités s'estompent, son amplitude maximale diminue, sa durée s'étale.

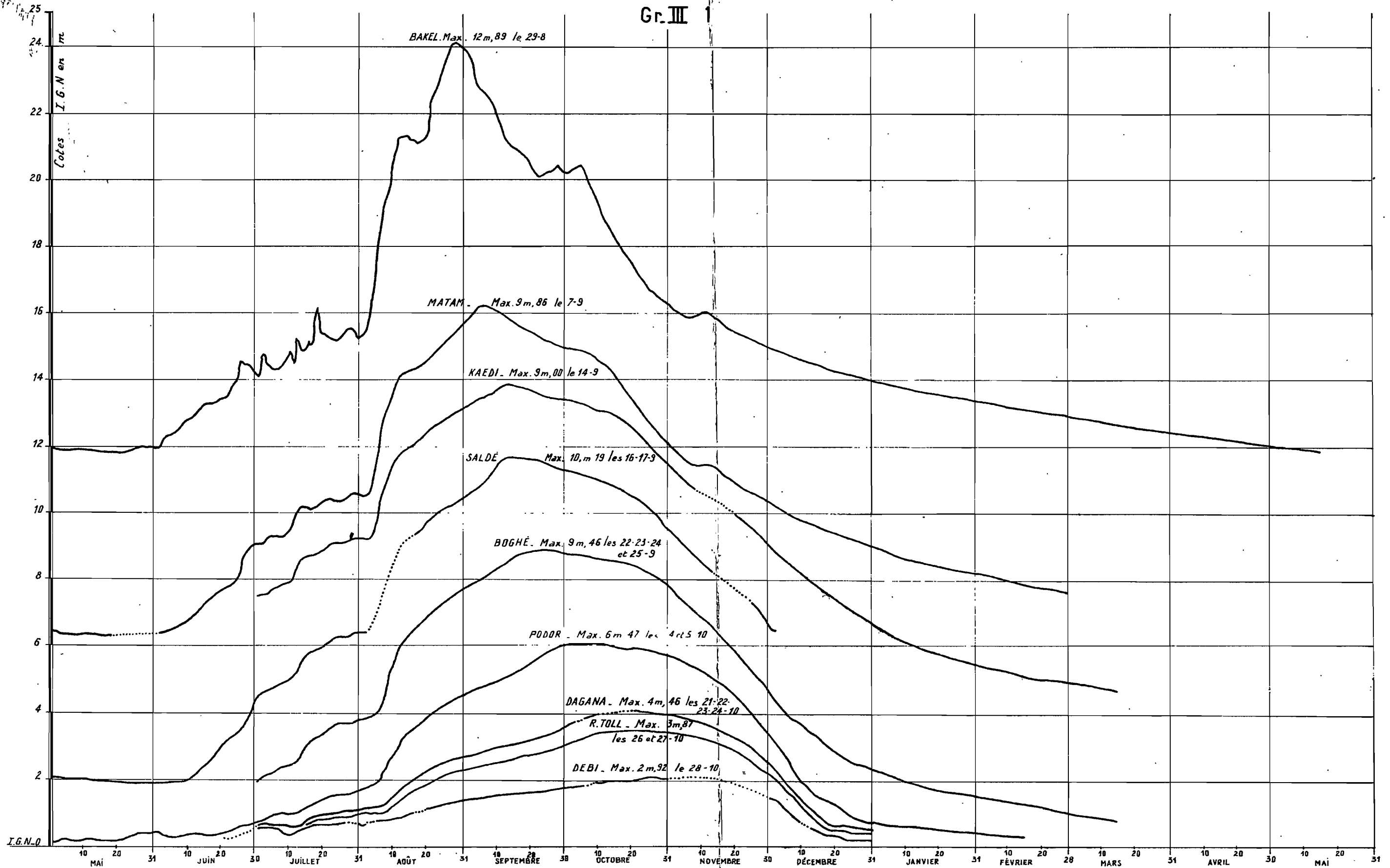
A BAKEL, en tête de la Vallée, la première montée des eaux se fait sentir dans le courant de Mai ou au début de Juin, mais jusqu'en Juillet, la croissance reste assez lente. Elle s'accélère en Août et dès cette époque, on peut relever des pointes de débit importantes, car l'hydrogramme général de la crue présente des irrégularités notables. L'amplitude maximale, (10,5 m environ en année moyenne) est généralement atteinte dans le courant de Septembre. En Octobre, la décrue est rapide mais se trouve parfois interrompue par de petites recrudescences passagères. En Novembre, la décroissance devient très régulière et se poursuit jusqu'au mois de Mai de l'année suivante, tout en s'atténuant progressivement. A DAGANA, à l'autre extrémité de la Vallée, la montée des eaux débute timidement en Juin et reste peu sensible jusque vers la mi-Juillet. Elle s'amorce alors plus nettement tout en restant très progressive jusque vers la mi-October, où la crue atteint son amplitude maximale (3,3 m environ en année moyenne). Le maximum se maintient pendant plusieurs jours. Ensuite commence une lente décroissance qui s'accélère en Novembre puis s'atténue progressivement jusqu'au mois de Juin. Mais la régularité de cette décroissance est masquée dès le mois de Décembre par les oscillations de la marée.

Entre BAKEL et DAGANA, l'hydrogramme de la crue annuelle affecte des formes intermédiaires. Son amplitude diminue sensiblement entre BAKEL et MATAM, puis assez lentement jusqu'à BOGHE. En aval de cette station, la décroissance s'accroît et se poursuit jusqu'à l'embouchure. A SAINT-LOUIS, l'amplitude de la crue n'est plus que d'environ 1 mètre, c'est-à-dire qu'elle est réduite au dixième de sa valeur à BAKEL.

Parallèlement à ce laminage progressif de la crue annuelle, la date de son maximum subit un décalage de l'amont vers l'aval. Cette date, bien qu'assez variable tombe en moyenne dans la 1ère quinzaine de Septembre pour BAKEL et dans la 2ème quinzaine d'October pour la station de DAGANA.

# ÉVOLUTION DE LA CRUE 1958 DANS LA VALLÉE ET LE DELTA

Gr. III 1



Ces données vont être précisées dans les paragraphes qui suivent.

Le graphique n° III.1. représente l'évolution de la crue 1958 dans la vallée et le delta.

Bien que cette crue soit nettement supérieure à la moyenne, son évolution reflète assez bien celle de la crue annuelle précédemment décrite.

## I.2. - Etude des crues et de leur propagation

### I.2.1. - Amplitude de la crue

L'amplitude de la crue en année moyenne est donnée dans le tableau n° 3.1. pour les différentes stations de la Vallée et pour les stations du Haut Bassin où l'on dispose d'une période d'observation assez longue. (SENEGAL moyen et FALEME à KIDIRA).

L'amplitude de la crue sur le SENEGAL moyen est très variable d'une station à l'autre (minimale à BAFOULABE et maximale à KAYES). A l'aval de BAKEL, elle décroît de façon notable, sauf entre MATAM et SALDE où elle conserve sensiblement la même valeur. La relative constance de l'amplitude entre ces 2 stations s'explique par la présence de seuils et une réduction importante du lit majeur à la hauteur de SALDE. A partir de BOGHE, la décroissance est très sensible et régulière (2,2 cm/km entre BOGHE et DAGANA).

On a reporté sur un même graphique (Gr n° III.2) les variations de l'amplitude de BAKEL à SAINT-LOUIS relatives à des crues de fréquence 10, 50 et 90 %. L'allure des variations est la même pour les 3 courbes. On note cependant que c'est entre MATAM et BOGHE, que les écarts relatifs d'amplitude sont les moins importants.

TABLEAU n° 3.1

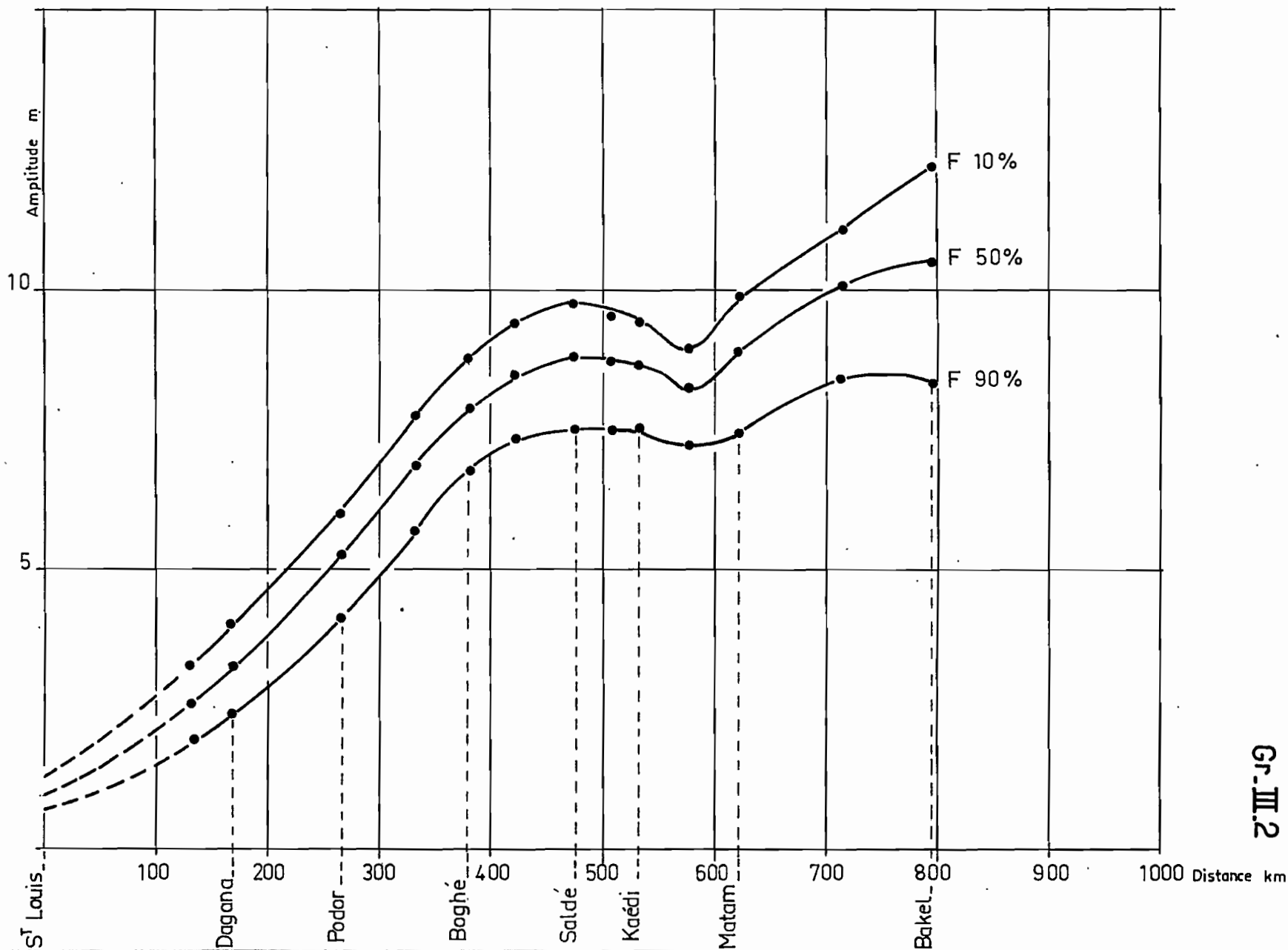
AMPLITUDE de la CRUE en ANNEE MOYENNE

Stations	Hauteur:	Etiage:	Amplitude en m		
	maximale:	absolu:	(Année moyenne)		
	(IGN)	médian	SENEGAL:	FALEME:	DOUE
		(IGN)			
BAFOULABE	92,99	89,11	3,88		
GALOUGO	77,08	69,63	7,45		
GOUINA 2 <sup>ème</sup> bief	54,82	48,06	6,76		
KAYES	29,51	20,54	8,97		
KIDIRA	29,00	19,86		9,14	
BAKEL	22,11	11,58	10,53		
OUAOUNDE	18,71	8,60	10,11		
MATAM	15,17	6,27	8,90		
NGUIGUILONE	13,37	(5,12)	(8,25)		
KAEDI	12,10	3,38	8,72		
DIORBIVOL	11,39	2,65	8,74		
SALDE	10,57	1,72	8,85		
NGOUI	10,47	1,79			8,68
DIOULDE-DIABE	9,51	1,06	8,45		
MADINA	9,21	1,76			7,45
BOGHE	8,14	(0,25)	(7,89)		
SERPOLI	7,02	(0,20)	(6,82)		
GUEDE	6,42	(0,10)			(6,32)
PODOR	5,36	(0,10)	(5,26)		
DAGANA	3,36	(0,05)	(3,31)		
RICHARD-TOLL	2,80	(0)	2,80		
ROSSO	2,67	(0)	2,67		
SAINT-LOUIS	1,00	(0)	1,00		

I.2.2. - Date du maximum de la crue

D'après les relevés de 1903 à 1964, les dates des maximums à KAYES et à BAKEL sont distribuées suivant une loi normale de Gauss avec une date moyenne d'apparition du maximum se situant le 5 Septembre pour KAYES et le 10 Septembre pour BAKEL. L'écart type pour les 2 distributions est sensiblement le même (12 jours environ). A KIDIRA, l'échantillon comporte 28 observations dont la distribution autour de la moyenne n'est pas symétrique. L'hypothèse de la normalité de la distribution ne peut toutefois être rejetée. Pour les fréquences inférieures à 80 %, la forme de la distribution est gaussienne et les données sont très voisines de celles obtenues à KAYES, ce qui laisse présumer l'existence d'une concomitance assez étroite des crues aux 2 stations.

# AMPLITUDE DE LA CRUE DANS LA VALLÉE



Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer

15.1.67  
JR

SEN. 41216

Gr. III.2

Pour les stations situées à l'aval de BAKEL, il semble, malgré un alignement moins bon des points représentatifs (report effectué en coordonnées Gausso-linéaires), qu'on puisse admettre comme pour BAKEL une loi de distribution normale.

Les données statistiques concernant les dates des maximums sont rassemblées dans le tableau n° 3-2.

### 1.2.3. - Vitesse de propagation

#### HAUT BASSIN

Dans le Haut Bassin, les relevés existants permettent seulement d'étudier la propagation des ondes de crues du BAFING, de DAKKA-SAÏDOU à DIBIA, et de la FALEME, de FADOUGOU à KIDIRA, ainsi que la propagation entre les stations aval de ces 2 affluents et la station de BAKEL.

Les temps moyens de propagation, calculés dans chaque cas à partir des données d'une dizaine d'ondes de crue bien individualisées sont rassemblés dans le tableau n° 3.3.

Les valeurs indiquées pour les sections KAYES-BAKEL et KIDIRA-BAKEL sont corrigées de l'influence du limnigramme de KIDIRA dans le premier cas et de celle du limnigramme de KAYES dans le second.

Les résultats montrent la différence très sensible qui existe entre le BAFING et la FALEME du point de vue propagation des crues (vitesse de propagation sur le BAFING double de celle observée sur la FALEME). L'écart, en réalité assez faible entre les pentes des 2 affluents, ne saurait expliquer à lui seul une telle différence et il convient d'admettre que les sections transversales du BAFING ont des caractéristiques hydrauliques meilleures que celles de la FALEME (lit mieux calibré, zones de débordements moins nombreuses).

On notera que les temps de propagation BAFING supérieur-BAKEL et haute-FALEME-BAKEL sont du même ordre : 5 jours en moyenne pour le premier et un peu plus de 6 jours pour le second. Nous compléterons ces données sur la propagation des crues sur les 2 principaux affluents du HAUT-BASSIN par l'étude de la conjonction des crues du SENEGAL moyen et de la FALEME. La comparaison des limnigrammes de KAYES et de KIDIRA pour la période 1951-64, montre qu'il existe une certaine similitude entre les variations du plan d'eau aux 2 stations. En particulier, on observe que leurs limnigrammes respectifs peuvent être découpés en éléments successifs couvrant les mêmes périodes dont chacune correspond à une séquence pluvieuse. Ceci montre que les régimes pluviométriques de la FALEME et du SENEGAL moyen sont

Tableau n° 3.2.

DATES DU MAXIMUM ANNUEL

Station	Dates moyennes	Dates extrêmes observées	Intervalle minimal englobant 67 % des crues	Intervalle minimal englobant 33 % des crues
KAYES	5-9	6-8 / 5-10	23-8 / 18-9	30-8 / 10-9
KIDIRA	4-9	21-8 / 10-10	24- / 20-9	28-8 / 15-9
*28 années*				
BAKEL	10-9	7-8 / 7-10	29-8 / 22-9	6-9 / 15-9
MATAM	17-9	12-8 / 17-10	7-9 / 25-9	13-9 / 20-9
KAEDI	24-9	29-8 / 26-10	16-9 / 2-10	20-9 / 26-9
BOGHE	30-10	2-9 / 5-11	24-9 / 11-10	28-9 / 5-10
MODOR	12-10	10-9 / 17-11	4-10 / 22-10	8-10 / 16-10
DAGANA	19-10	15-9 / 23-11	9-10 / 27-10	15-10 / 23-10

Tableau n° 3.3.

TEMPS DE PROPAGATION DANS LE HAUT BASSIN

Section	Temps de propagation (jours)	Vitesse de propagation (km/jour)	Distance (km)
<u>FALEME</u>			
FADOUGOU/GOURBASSI	2	84	168
GOURBASSI/KIDIRA	2,3	84	192
FADOUGOU/KIDIRA	4,3	84	360
FADOUGOU/confluent	(5,0)	(82)	410
<u>BAFING</u>			
DAKKA-SAIDOU/DIBIA	1,7	168	168
DAKKA-SAIDOU/confluent	(2,2)	(170)	377
<u>SENEGAL moyen</u>			
BAFOULABE/KAYES	1	127	127
KAYES/BAKEL	1,8	70	126
KIDIRA/BAKEL	1,2	67	80

caractérisés par une répartition semblable des précipitations dans le temps sur leurs bassins respectifs. Cette situation est normale étant donné que le BAFING, qui entre pour une part importante dans la constitution de l'hydrogramme de KAYES, draine un bassin contigu et ayant la même configuration que celui de la FALEME. Outre cette concordance des précipitations dans le temps, on observe que les hydraulicités aux deux stations, pour chaque séquence pluvieuse, sont très souvent comparables. Le fait que les séquences pluvieuses génératrices des maximums à KAYES et à KIDIRA, pour la période de 1951-64, coïncident 10 années sur 14, est assez significatif à cet égard (pour les 4 années où les maximums annuels à KAYES et à KIDIRA ne correspondent pas à la même séquence pluvieuse, c'est généralement le maximum annuel à KAYES qui détermine celui de BAKEL. Une seule exception en 1956 où le maximum à BAKEL correspond à celui de la FALEME). Pour préciser cette conjonction des crues du SENEGAL moyen et de la FALEME dont la considération est importante pour la Vallée, on a fait l'inventaire, par séquence pluvieuse, des maximums (annuels ou partiels) atteints à KAYES et à KIDIRA de 1951 à 1964 et noté leurs dates respectives. L'étude statistique montre que les pointes de crues à KIDIRA se produisent en moyenne après celles de KAYES (écart moyen 1 jour  $\frac{1}{2}$ , les écarts extrêmes étant -5 et + 10 jours). Ces résultats recourent assez bien ceux établis précédemment concernant les temps de propagation des crues sur le BAFING et sur la FALEME.

#### VALLEE DU SENEGAL

Le laminage important que subissent les crues à l'aval de BAKEL complique singulièrement l'étude de leur propagation et fait qu'il n'existe pas de définition vraiment satisfaisante du temps de propagation de la crue annuelle dans la Vallée. La définition normalement utilisée du temps de propagation (on identifie ce dernier au temps de propagation de son maximum) n'est pas toujours valable et conduit, du fait de la déformation du limnigramme de l'amont vers l'aval, à des résultats très dispersés. L'analyse des temps de propagation fournis par les 62 années d'observation montre que 2 facteurs essentiels interviennent dans les condi-

tions de propagation du maximum de la crue :

- l'amplitude de la crue
- la forme du limnigramme à la station de BAKEL.

Une étude complète du phénomène nécessiterait de déterminer l'influence propre à chacun de ces facteurs.

En ce qui concerne le second, le choix d'un paramètre caractéristique de la forme du limnigramme à BAKEL pose un problème délicat. On serait amené en fait à adopter un paramètre particulier pour chaque station de la Vallée. Nous allons aborder le problème pour la station de MATAM et nous verrons ensuite comment il se présente pour les autres stations, en particulier pour celle de DAGANA.

Compte tenu du laminage (variable suivant l'ampleur de la crue), le limnigramme à MATAM ne reproduit que les principales variations du limnigramme de BAKEL. Si par exemple ce dernier présente 2 pointes de crues bien individualisées celui de MATAM les reproduira mais modifiera leurs amplitudes respectives. La 2ème pointe est toujours moins amortie que la première et l'est d'autant moins que l'intervalle de temps qui sépare les 2 ondes de crue est plus court. La loi de propagation du maximum est par suite fort complexe. Il faudrait faire intervenir des paramètres qui tiennent compte du nombre d'ondes de crue, de leurs hauteurs respectives et de leur distribution dans le temps. On conçoit ainsi que le temps de propagation du maximum de la crue entre BAKEL et MATAM puisse prendre des valeurs très différentes. Il est maximal lorsque l'onde maximale à BAKEL est suivie d'ondes de crue plus faibles mais suffisantes pour qu'elles produisent la hauteur maximale à MATAM. Il est minimal lorsque le maximum à BAKEL n'est suivi d'aucune onde de crue notable. L'année 1964 correspond au temps de propagation le plus long observé (21 jours). Pour une crue d'amplitude voisine, le temps de propagation est de 4 jours seulement en 1955.

On réduit notablement l'amplitude de ces variations en posant le problème différemment c'est-à-dire en considérant le temps de propagation jusqu'à MATAM de l'onde de crue responsable du maximum à BAKEL, que cette onde de crue produise ou non le maximum à MATAM. Dans ces conditions, on peut

valablement étudier l'influence de l'ampleur de la crue (mesurée à BAKEL) sur le temps de propagation.

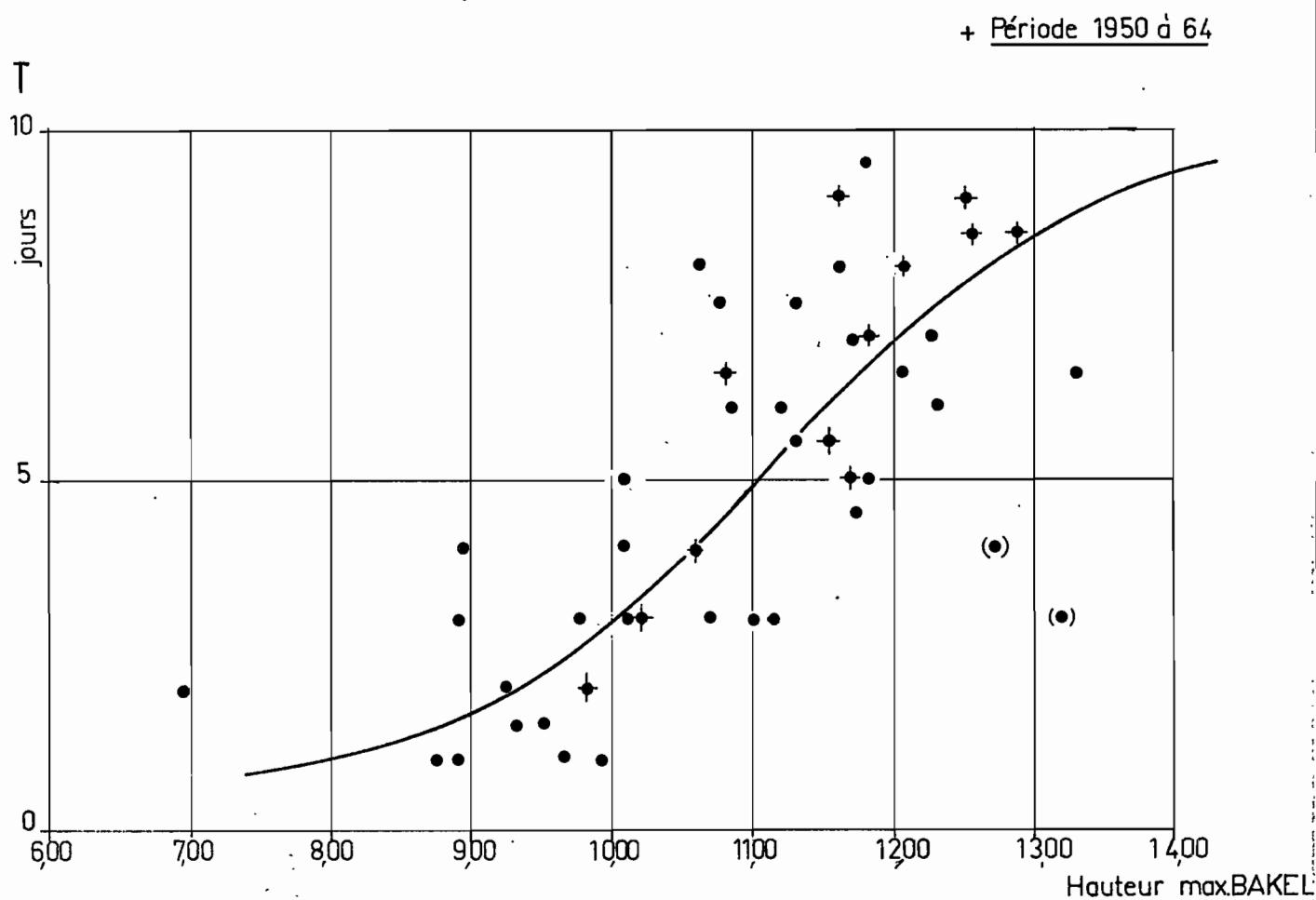
Le temps de propagation ainsi défini ne peut pas toujours être déterminé de façon précise. C'est le cas notamment lorsque le maximum à MATAM résulte de la composition de 2 ondes de hauteurs maximales voisines se succédant à quelques jours d'intervalle à BAKEL. Dans ce cas on a adopté une date moyenne comme date du maximum à BAKEL. Citons encore le cas, assez fréquent, où la détermination du temps de propagation est impossible. C'est celui où le maximum à BAKEL résulte d'une petite onde de crue qui se superpose à l'onde principale et qui par suite du laminage n'est pas identifiable sur le limnigramme de MATAM.

Pour les 45 années de la période 1903-1966, où le temps de propagation défini plus haut a pu être déterminé, on a porté les résultats en regard de la hauteur maximale atteinte à BAKEL. Le graphique obtenu (GR III.3.) met en évidence l'influence de l'amplitude de la crue sur le temps de propagation qui varie de 1 jour pour la crue la plus faible à 9 jours environ pour la crue la plus forte (vitesse de propagation variant de 170 à 19 km/jours).

Considérons maintenant les stations plus éloignées de BAKEL. Les ondes de crue formant la partie supérieure du limnigramme à BAKEL (onde maximale et ondes secondaires) perdent progressivement leur individualité en se propageant dans la Vallée en sorte qu'au-delà d'un certain point de la Vallée, qui se situe le plus souvent entre KAEDI et BOGHE, l'onde de crue ne présente plus qu'un seul maximum.

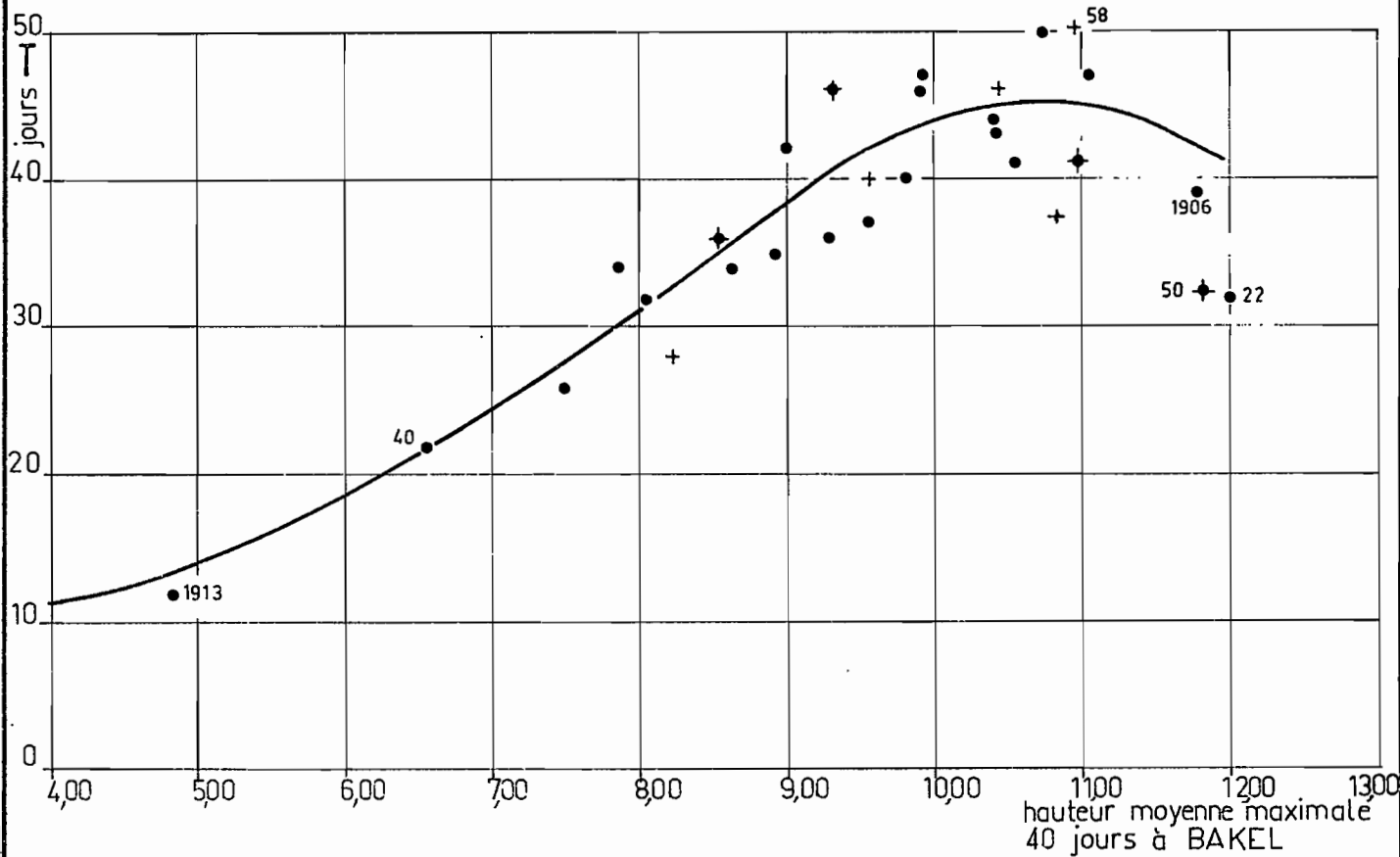
Le temps de propagation, tel que nous l'avons défini pour la section BAKEL-MATAM, devient incontrôlable. La seule remarque qu'on puisse faire est que la date du maximum, en descendant la Vallée, est de moins en moins influencée par la date du maximum à BAKEL et dépend davantage de la forme générale de la partie supérieure du limnigramme de cette station. On est donc amené, pour les stations situées au-delà de MATAM à définir une nouvelle expression du temps de propagation. Le procédé le plus simple consiste à prendre pour base du calcul, non plus la date du maximum à BAKEL,

Temps de propagation de BAKEL à MATAM  
(Max. à BAKEL et pointe correspondante à MATAM)



# Temps de propagation de BAKEL à DAGANA (Période 1903-64)

+ Période 1950-64



hauteur moyenne maximale  
40 jours à BAKEL

mais celle correspondant au centre de gravité de la partie du limnigramme de BAKEL située au-dessus d'une certaine cote. Cette dernière est définie comme suit. Pour les crues faibles, on a adopté pour cotes de base, des hauteurs caractéristiques correspondant à des durées inférieures à 30 jours, cette durée variant avec l'importance de la crue. Pour les crues moyennes et fortes, il faut tenir compte de l'influence du lit majeur et les meilleurs résultats ont été obtenus en considérant la partie du limnigramme de BAKEL située au-dessus de la cote 950 à l'échelle, hauteur à partir de laquelle le lit majeur intervient dans les conditions de propagation.

Avec ces conventions, nous avons déterminé les temps de propagation de BAKEL à DAGANA pour la période 1903-1964. Les résultats sont présentés par le graphique n° III.4. dans lequel le temps de propagation est porté en regard de la hauteur moyenne maximale de 40 jours à BAKEL (cette dernière caractérise mieux l'ampleur de la crue que la hauteur maximale annuelle).

Ce graphique montre qu'il existe une assez bonne corrélation entre le temps de propagation et l'amplitude de la crue (temps de propagation compris entre 10 et 45 jours). On observe qu'au-delà d'une certaine amplitude correspondant à la limite entre les crues fortes et les crues très fortes, le temps de propagation tend à diminuer. Les valeurs observées pour les 4 plus fortes crues (1906-22-36 et 1950) sont en effet très significatives à cet égard.

On constate donc que les très faibles crues se déplacent approximativement comme une onde de translation (vitesse moyenne de 50 km par jour entre BAKEL et DAGANA, mais dépassant 100 km/jour dans le secteur amont BAKEL RATAM).

Il apparaît également que les crues subissent un laminage proportionnel à leur amplitude qui ralentit considérablement leur vitesse de propagation apparente. La vitesse moyenne de propagation des crues de fréquence inférieure à 50 % varie de 15 à 20 km/jour.

Les données statistiques relatives aux temps de propagation tel que nous l'avons défini pour MATAM et DAGANA sont rassemblées dans le tableau ci-dessous.

Tableau n° 3.4.

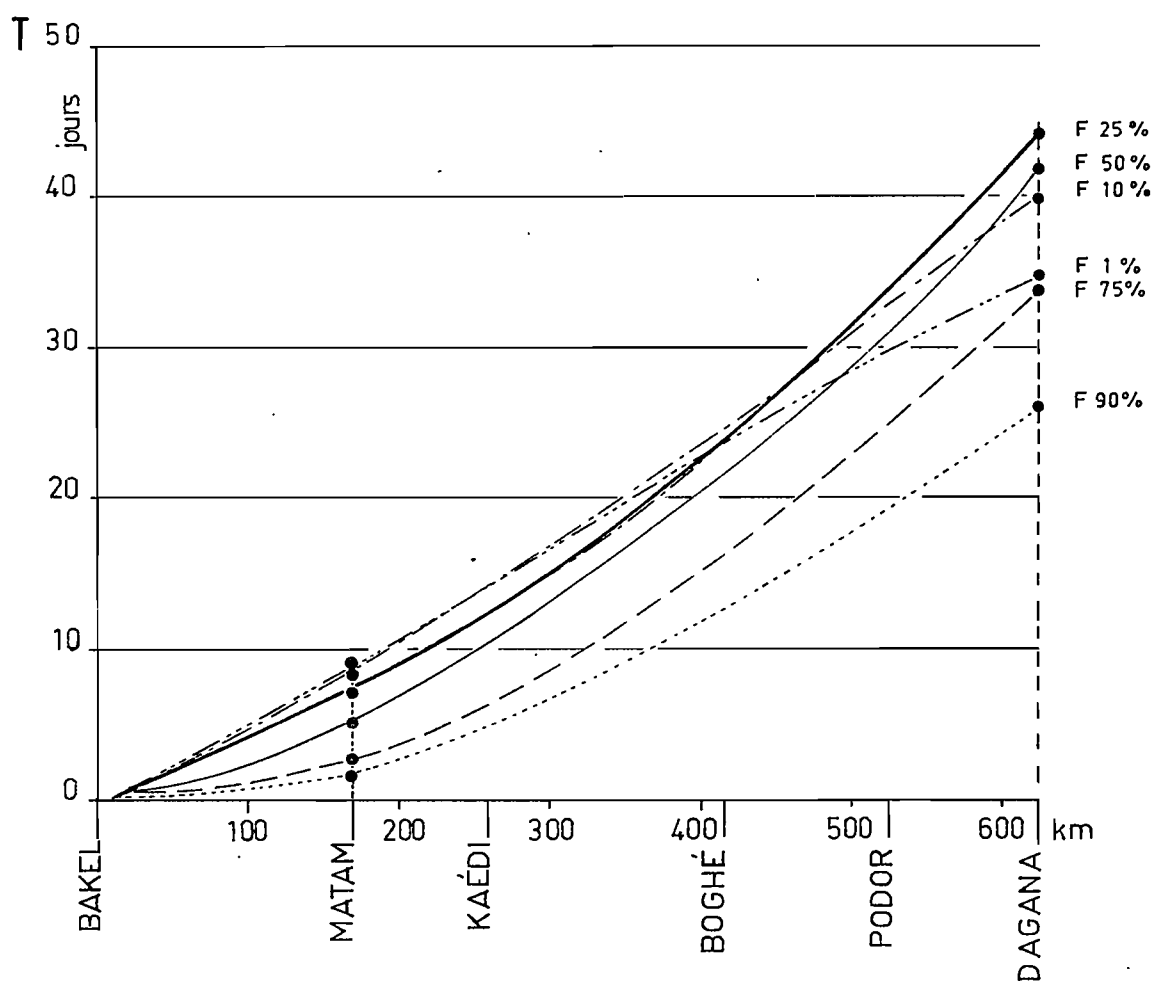
TEMPS DE PROPAGATION DES CRUES (EN JOURS) DE BAKEL A :

	MATAM (1)	DAGANA (2)
<u>Valeur maximale</u>	9,5	55
<u>Valeur de fréquence</u>		
25 %	7	45
50 %	5	39
75 %	3	32
<u>Valeur minimale</u>	1	12

(1) Temps défini en considérant l'onde de crue responsable du maximum à BAKEL.

(2) Temps défini en adoptant pour date du maximum à BAKEL celle du centre de gravité de la partie supérieure du limnigramme.

## Temps de propagation dans la vallée des crues de diverses fréquences



Les corrélations liant le temps de propagation depuis BAKEL à l'amplitude de la crue à cette station permettent de déterminer les temps de propagation relatifs à des crues de diverses fréquences. A partir des valeurs obtenues pour les sections BAKEL-MATAM et BAKEL-DAGANA, on détermine par interpolation celles relatives aux sections intermédiaires (Gr n° III.5.). On observe sur ce graphique que la vitesse de propagation tend à devenir uniforme tout au long de la Vallée pour les crues de fréquence inférieure à 25 % (vitesse sensiblement constante et égale à 18 km/jour).

Les temps bruts de propagation obtenus à partir des dates des maximums (tableau n° 3.5.) présentent une dispersion plus forte, notamment pour MATAM, mais on constate surtout qu'ils sont moins bien corrélés que les précédents avec l'amplitude de la crue.

Tableau n° 3.5.

TEMPS DE PROPAGATION DU MAXIMUM DE LA CRUE (EN JOURS) DE BAKEL A :

	MATAM	KAEDI	BOGHE	PODOR	DAGANA
<u>Valeur maximale</u>	25	31	38	48	59
<u>Valeur de fréquence</u> (au dépassement)					
25 %	8	17	27	39	46
50 %	6	13	23	31	37
75 %	3	9	18	26	33
<u>Valeur minimale</u>	1	3	4	6	8

Cette remarque s'applique aux temps de propagation depuis MAKEL. Si on s'intéresse aux temps de propagation à partir de KAEDI, où l'onde de crue annuelle ne présente généralement qu'un seul maximum, le calcul du temps de propagation, basé sur les dates des maximums, redevient valable et conduit à des résultats plus cohérents. Pour la section KAEDI-DAGANA, les résultats se traduisent par une distribution gaussique au temps de propagation (valeur moyenne 24 jours, écart type 7,5 jours) et une assez bonne corrélation entre le temps de propagation et l'amplitude de la crue (GR n° III.6.). Cette corrélation est encore améliorée si on corrige le temps de propagation au moyen d'un paramètre caractérisant l'asymétrie de la partie supérieure du limnigramme de KAEDI (terme positif si la pente du limnigramme à la décrue est plus forte qu'à la crue et inversement. Les crues 1955 et 1958 d'importance comparable et dont les temps de propagation respectifs (entre KAEDI et DAGANA) sont respectivement de 22 et de 38 jours, constituent 2 cas extrêmes assez représentatifs de cette influence de la forme du limnigramme sur le temps de propagation.

#### I.2.4. Corrélations entre les hauteurs maximales annuelles aux différentes stations

Les corrélations entre les hauteurs maximales annuelles de 2 stations, ne sont étroites que si les apports du bassin intermédiaire sont peu importants. C'est le cas des stations du SENEGAL moyen, de BAFOULABE à KAYES et des stations de la VALLEE.

Pour le SENEGAL moyen, on aboutit, d'après les relevés de la période 1903-1964, aux équations de régression suivantes (hauteurs exprimées en cm), X représentant les hauteurs maximales à la station amont et Y, celles à la station aval.

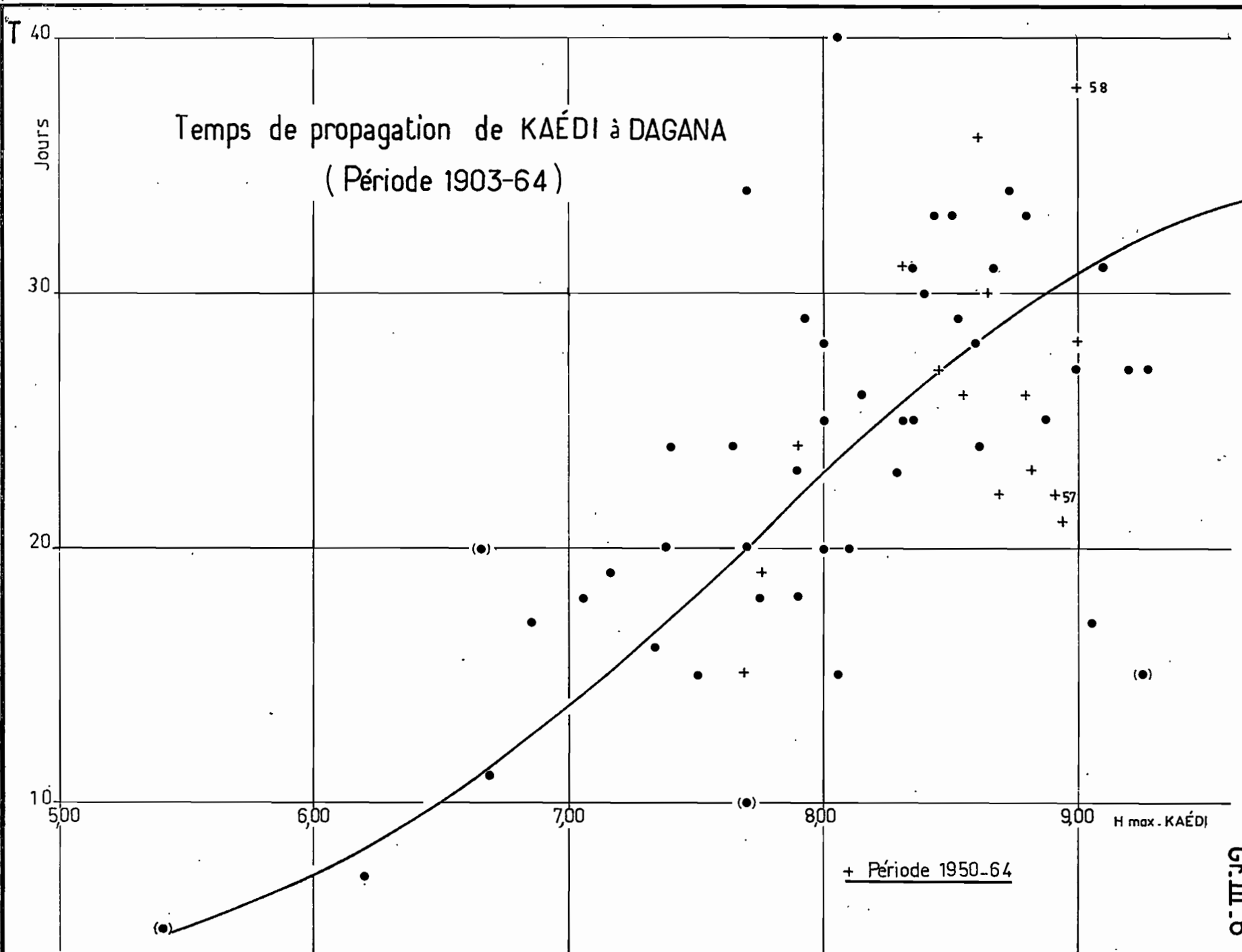
Entre BAFOULABE et GALOUGO (28 années de relevés communs).

$$Y = 2,63 X - 336$$

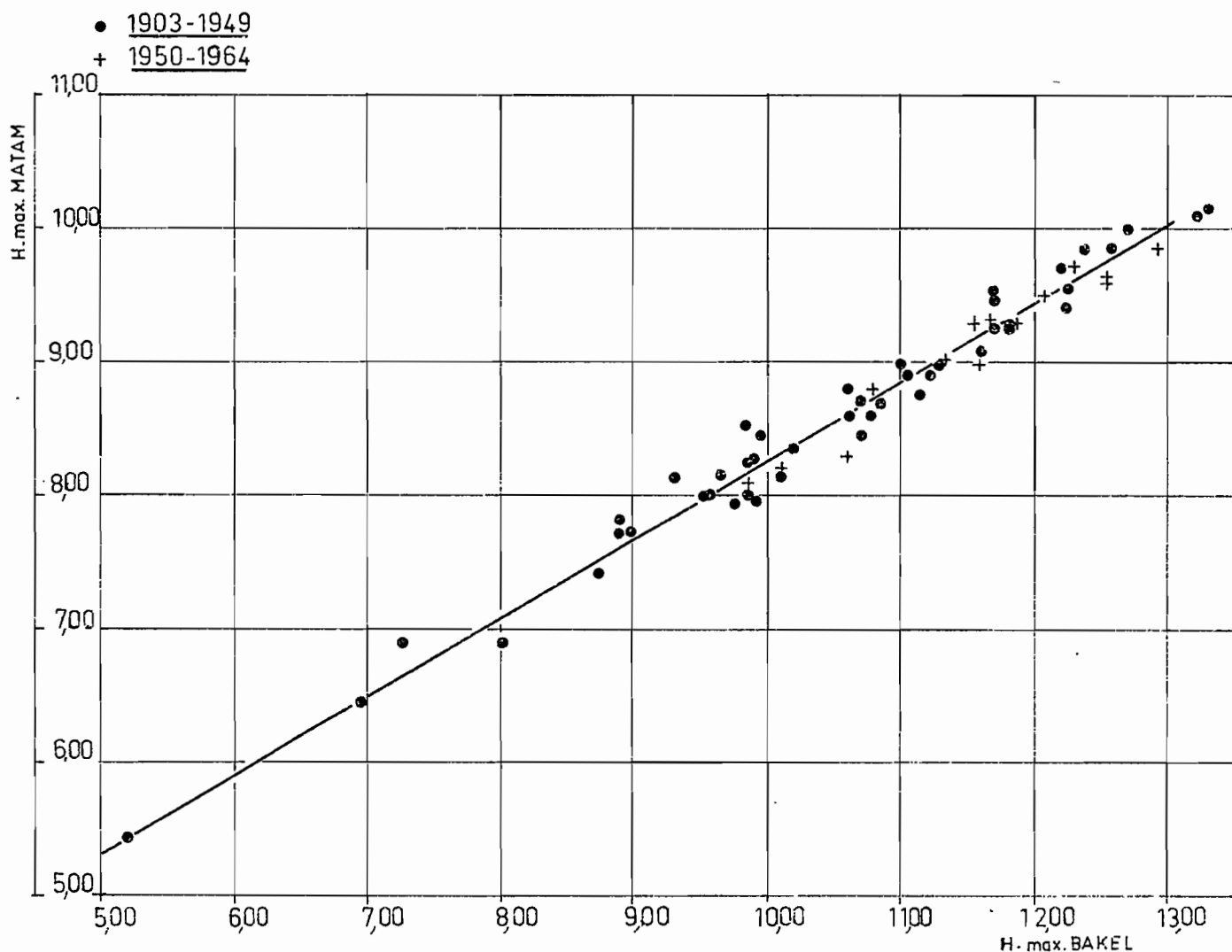
$$Y = 2,35 X - 212$$

$$X \leq 440$$

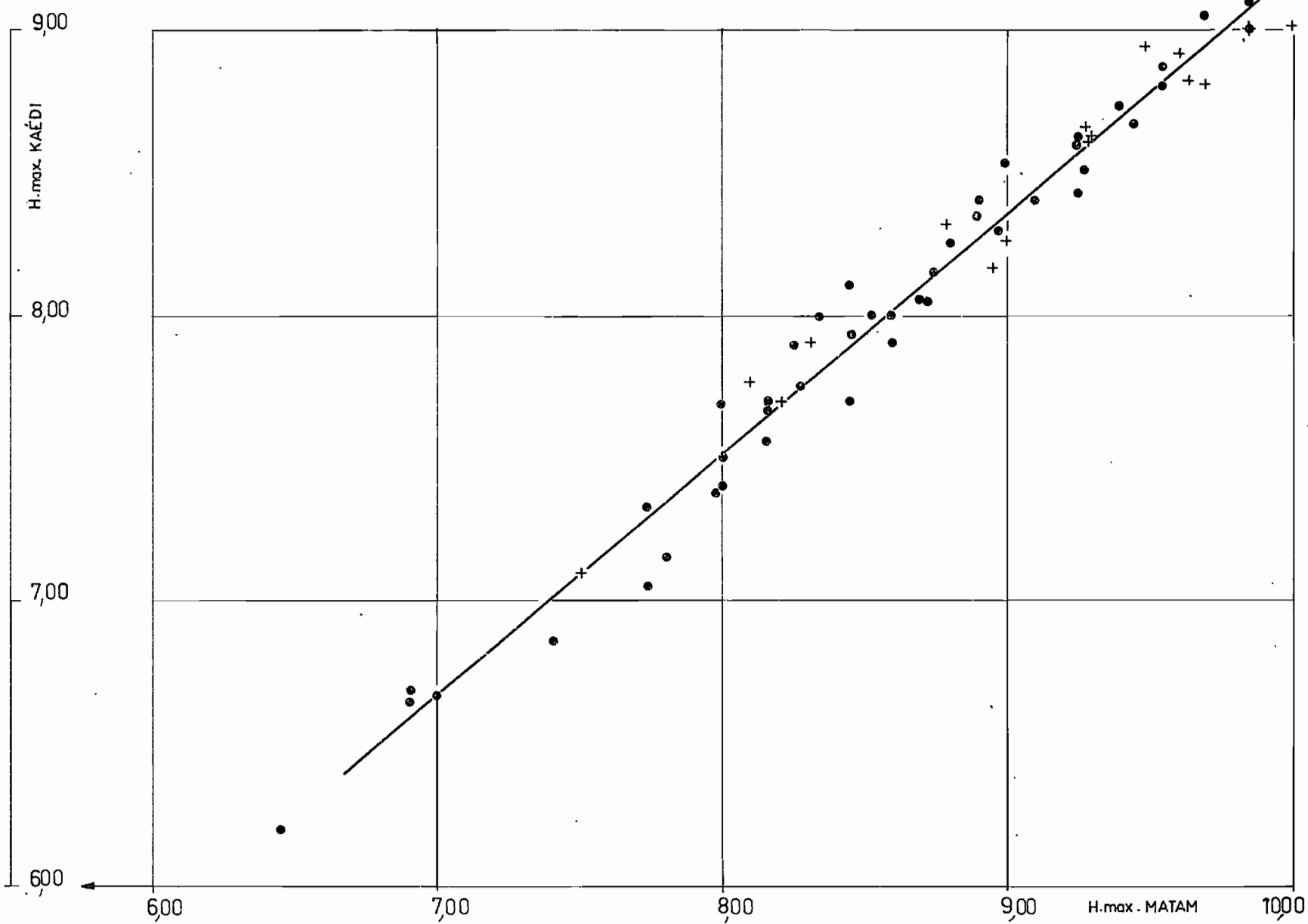
$$X \geq 440$$



Correlation entre les hauteurs maximales à BAKEL et à MATAM



# Correlation entre les hauteurs maximales à MATAM et à KAÉDI



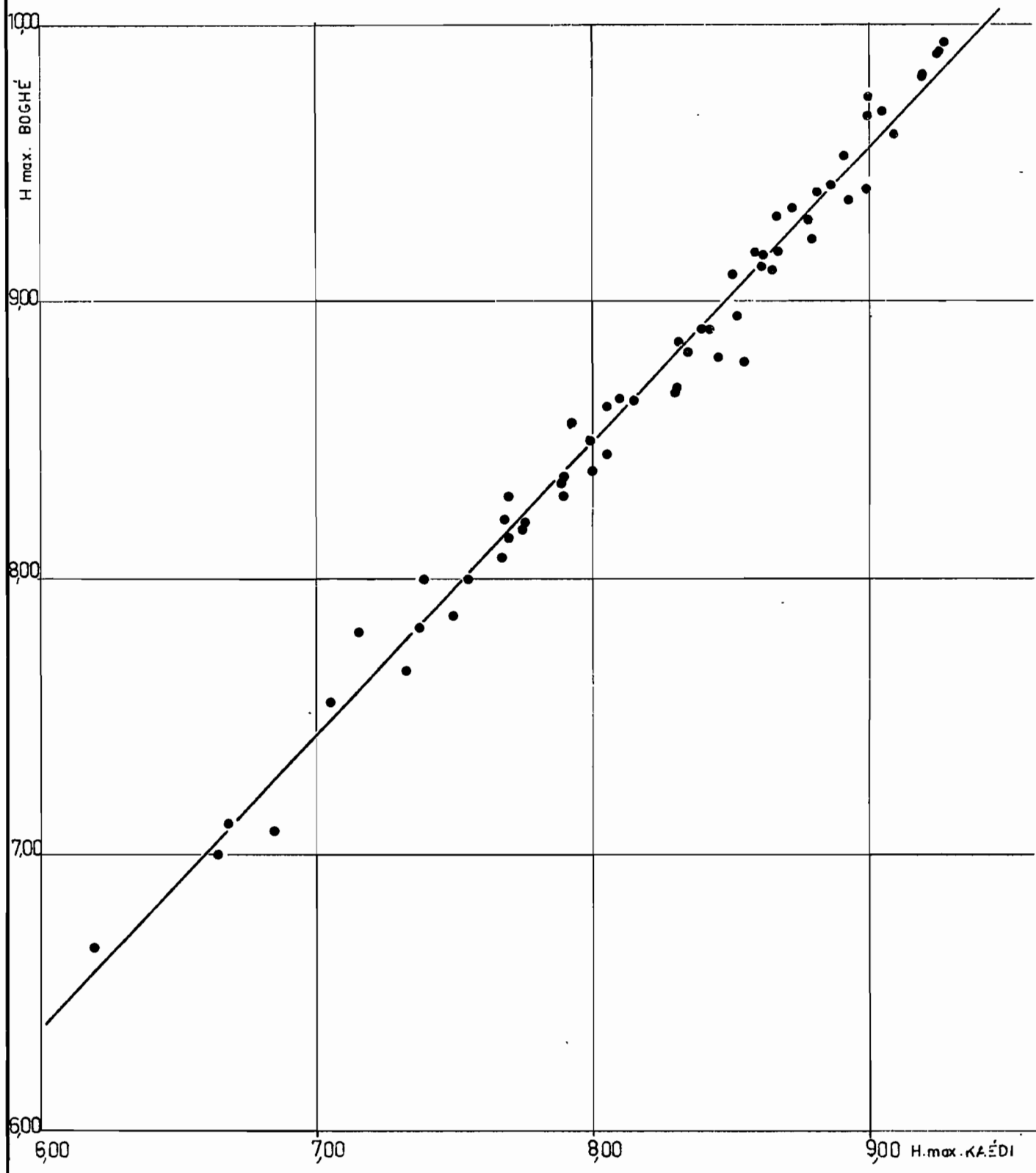
Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer

2.5.67  
JR

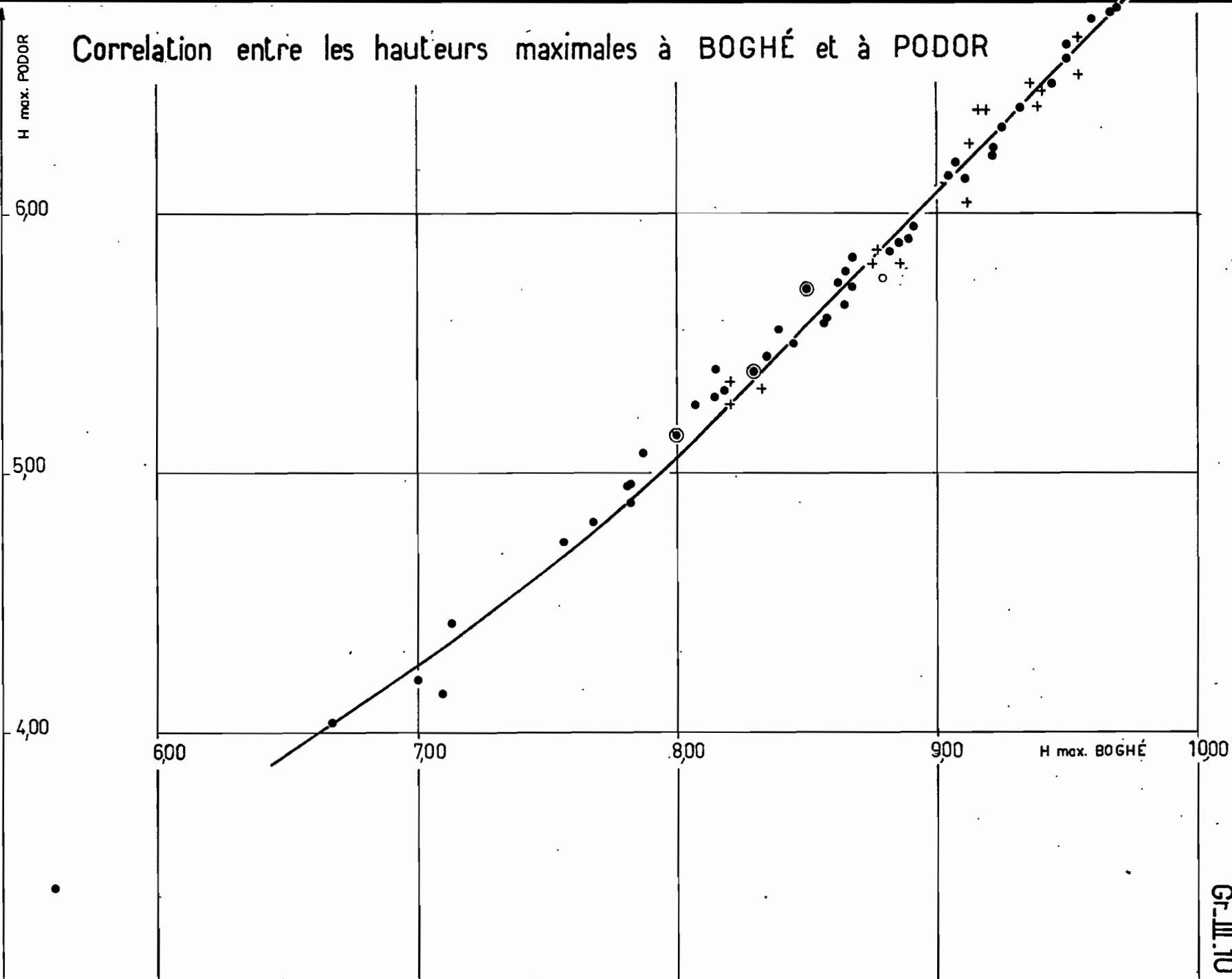
SEN. 41.222

Gr. III.8

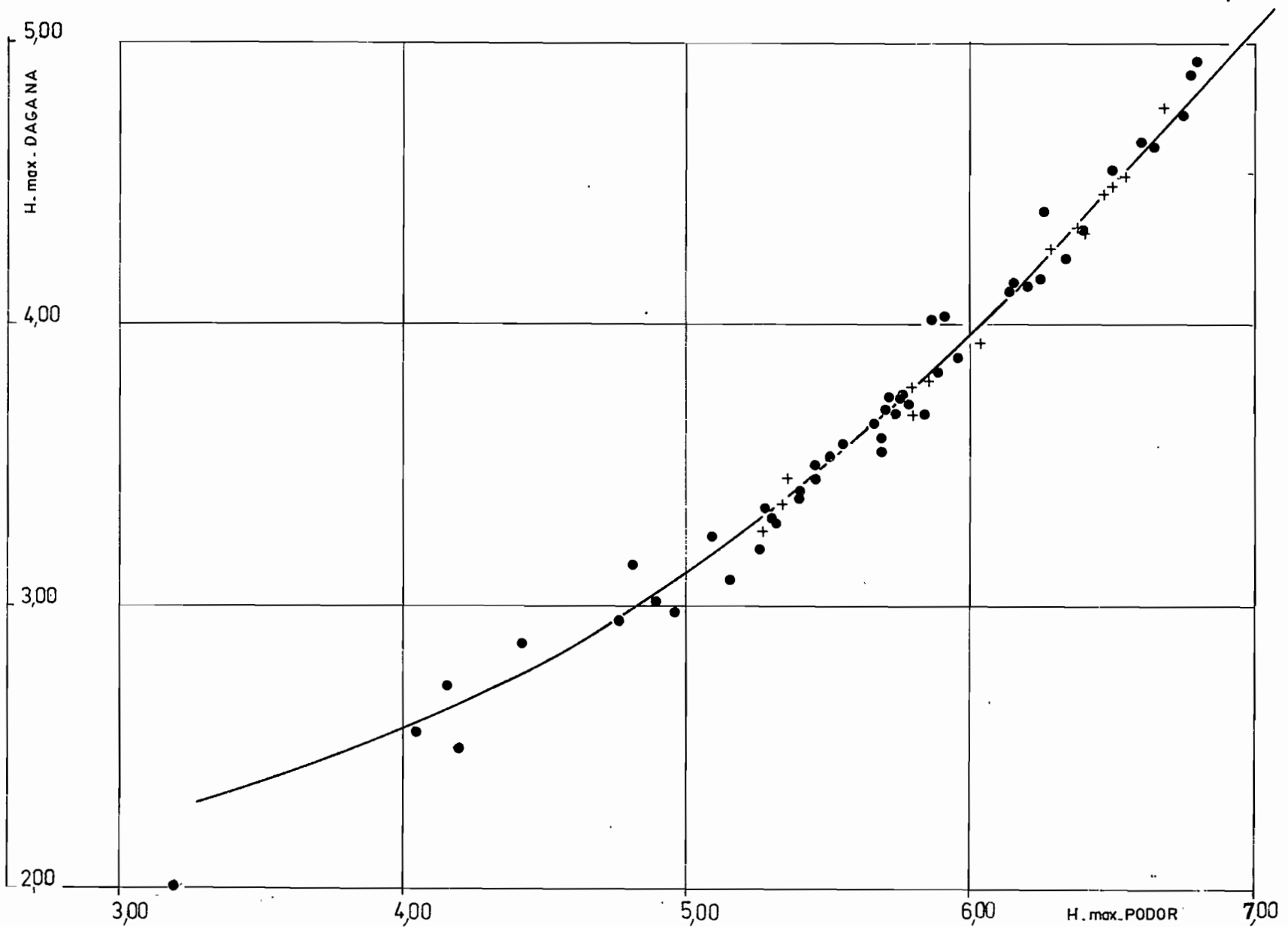
### Correlation entre les hauteurs maximales à KAÉDI et à BOGHÉ



Correlation entre les hauteurs maximales à BOGHÉ et à PODOR



# Correlation entre les hauteurs maximales à PODOR et à DAGANA



Entre GALOUGO et GOUINA 2ème bief (11 années de relevés communs).

$$Y = 0,76 X + 107$$

Entre GOUINA 2ème bief et KAYES (13 années de relevés communs).

$$Y = 2X - 470 \quad (X \leq 750)$$

$$Y = 1,32X + 40 \quad (X \geq 750)$$

Entre KAYES et ALBIBEDI (39 années de relevés communs).

$$Y = 0,99X - 30 \quad (X \leq 1000)$$

$$Y = 0,78X + 180 \quad (X \geq 1000)$$

Pour la Vallée, il est évident que la forme du limnigramme à une station, dont on a constaté l'influence sur le temps de propagation, intervient de façon tout à fait analogue dans la détermination de la hauteur maximale atteinte à une station située à l'aval. Cette influence croît avec la distance séparant les 2 stations considérées. En ce qui concerne les couples successifs formés par les stations principales de la Vallée, les corrélations entre leurs hauteurs maximales annuelles sont relativement étroites (voir Gr n° III.7. à III.11.) et permettent de prévoir quelques jours à l'avance, le niveau maximal de la crue à chacune d'entre elles. En se basant sur les relevés de la période 1900-1964, on aboutit pour les stations principales, avec les conventions faites précédemment, aux équations de régression suivantes.

Entre BAKEL et MATAM :

$$Y = 0,59X + 237 \quad (\text{précision} \\ \pm 25 \text{ cm})$$

Entre MATAM et KAEDI :

$$Y = 0,85X + 70 \quad (\text{précision} \\ \pm 15 \text{ cm})$$

Entre KAEDI et BOGHE :

$$Y = 1,06X \quad (\text{précision} \\ \pm 15 \text{ cm})$$

Entre BOGHE et PODOR :  
 $Y = 0,006\bar{X}^2 - 0,06X + 174$  (précision  
 $\pm 10$  cm)

Entre PODOR et DAGANA :  
 $Y = 0,00135\bar{X}^2 - 0,635X + 293$  (précision  
 $\pm 7,5$  cm)

On remarque, d'après ces équations, que les écarts interannuels de hauteurs maximales décroissent de façon sensible de BAKEL à MATAM et varient relativement peu de MATAM à DAGANA si on considère pour cette région du fleuve les crues d'amplitude supérieure à la moyenne (pentés des droites de régression et des branches de paraboles voisines de l'unité).

Il est également intéressant d'établir les équations de régression des hauteurs maximales pour les couples de stations formés par les stations secondaires et les stations principales les plus proches. Cette possibilité existe pour la totalité des stations secondaires de la Vallée. Pour ces dernières, on dispose en effet de 5 à 13 ans de relevés récents, correspondant à des crues d'amplitude assez différentes. Cela permet de déterminer les hauteurs maximales de diverses fréquences à ces stations, à partir des données correspondantes établies pour les stations principales. On aboutit aux équations de régression suivantes.

Entre BAKEL et OUAOUNDE :  
 $Y = 0,75X + 202$  ( $X \leq 1150$ )  
 $Y = 0,50X + 489$  ( $X \geq 1150$ )

Entre MATAM et NGUIGUILONE :  
 $Y = 0,74X + 275$

Entre KAEDI et DIORBIVOL :  
 $Y = 1,08X + 36$

Entre KAEDI et SALDE :  
 $Y = 0,0012\bar{X}^2 - 0,75X + 730$

Entre SALDE et DIOULDE DIABE :

$$Y = 0,89X + 166$$

Entre SALDE et BOGHE :

$$Y = 1,01X - 55$$

$$(X \leq 915)$$

$$Y = 0,74X + 192$$

$$(X \geq 915)$$

Entre BOGHE et SERPOLI :

$$Y = 1,04X - 124$$

Entre DAGANA et RICHARD-TOLL :

$$Y = 0,80X + 16$$

$$(X \leq 380)$$

$$Y = 0,95X - 41$$

$$(X \geq 380)$$

Entre DAGANA et ROSSO :

$$Y = 0,75X + 5$$

$$(X \leq 400)$$

$$Y = 0,90X - 55$$

$$(X \geq 400)$$

Entre DAGANA et DIAOUAR :

$$Y = 0,56X + 4$$

$$(X \leq 430)$$

$$Y = 1,12X - 237$$

$$(X \geq 430)$$

Entre DAGANA et KM 75 :

$$Y = 0,48X - 6$$

$$(X \leq 430)$$

$$Y = 1,05X - 252$$

$$(X \geq 430)$$

Entre DAGANA et GOROM aval (M'HEOU) :

$$Y = 0,33X + 7$$

$$(X \leq 430)$$

$$Y = 0,90X - 238$$

$$(X \geq 430)$$

Entre SALDE (X) et N'GOUI (Y)

$$Y = 0,94X + 220$$

Entre SALDE (X) et MADINA (Y) :

$$Y = 0,76X + 268$$

Entre PODOR (X) et GUEDE (Y) :

$$Y = 0,64X + 330$$

$$(X \leq 500)$$

$$Y = 0,69X + 305$$

$$(X \geq 500)$$

Pour les stations du Delta à l'aval de ROSSO, les formules de régression établies à partir de 3 à 5 années de

relevés, sont très approximatives. D'autre part elles cessent d'être valables pour les très faibles crues ( $Y \leq 1,20$  m IGN environ).

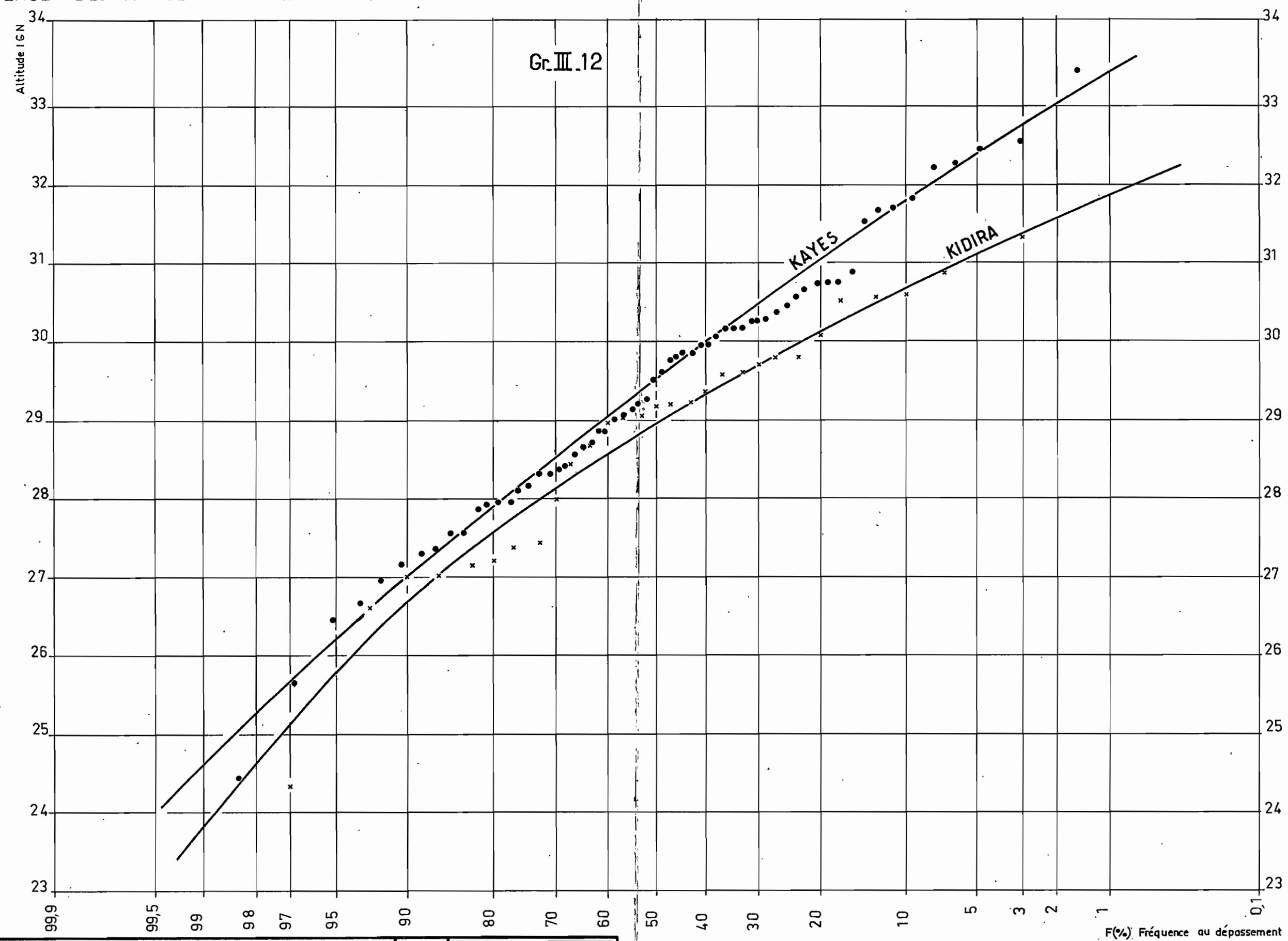
#### I.2.5. - Etude statistique des hauteurs maximales annuelles

Le report graphique des hauteurs maximales (échelle linéaire) en fonction de leur fréquence au dépassement (échelle gaussique) a permis d'ajuster, pour chaque station où les relevés sont suffisamment nombreux, une courbe expérimentale de fréquence (Gr n° III.12. et III.13.). Nous avons relevé, sur les différentes courbes d'ajustement, les hauteurs maximales correspondant à diverses fréquences et rassemblé ces données dans un tableau (n° 3.6.) en les exprimant dans les 2 systèmes d'utilisation possibles : hauteur à l'échelle (en cm) et altitudes IGN (en m).

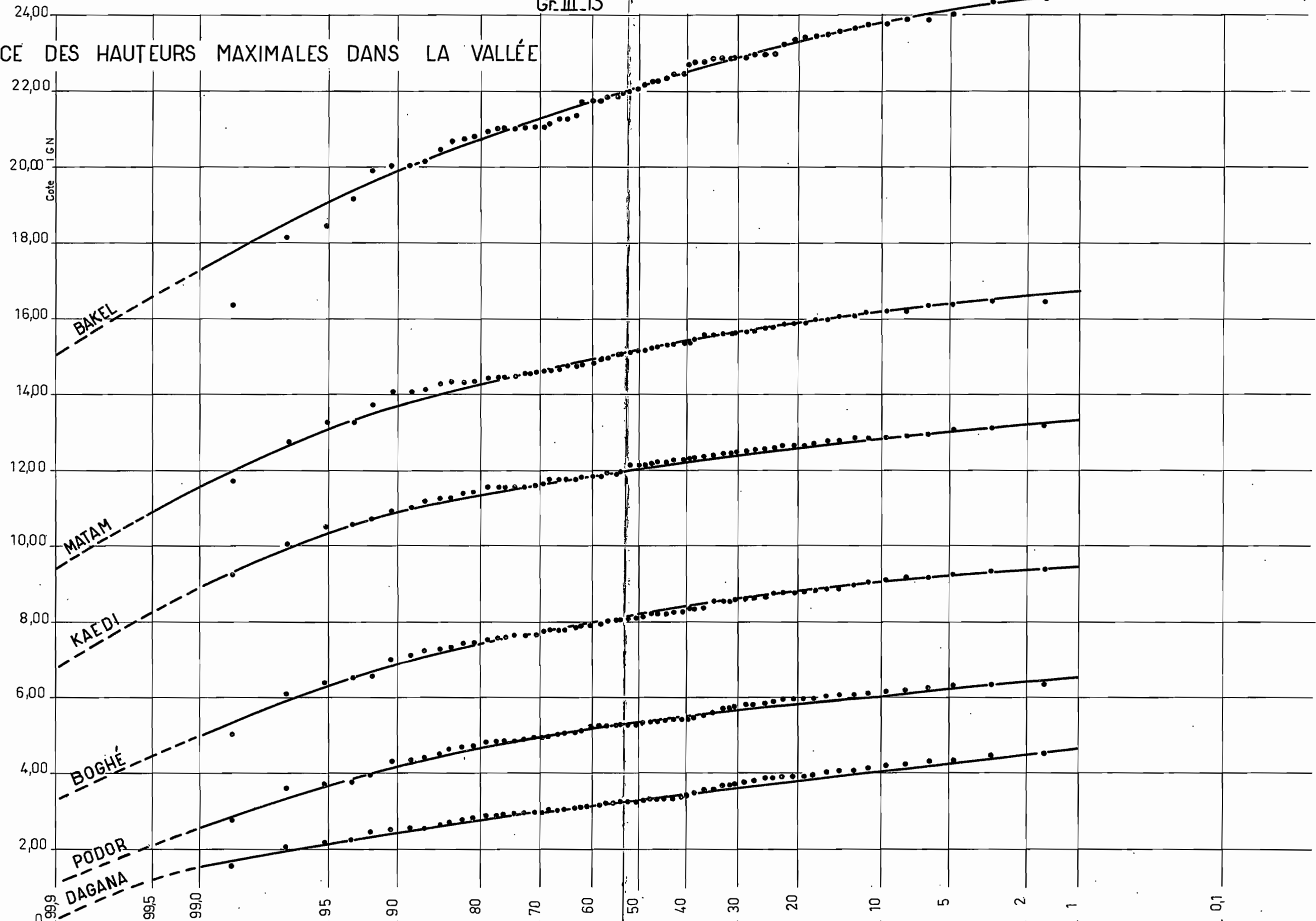
A partir de ces données, on détermine celles relatives aux différentes stations secondaires en utilisant les formules de régression établies au paragraphe précédent. Les résultats concernant cette 2ème catégorie de stations sont présentés par le tableau n° 3.7. Les valeurs correspondant aux fréquences extrêmes ont été extrapolées et figurent entre parenthèses. Ces données permettent de tracer pour des fréquences variées, les profils en long des hauteurs maximales. On constate sur le profil en long des hauteurs maximales du SENEGAL de BAKEL à SAINT-LOUIS (Gr n° III.14.), que le tracé présente quelques irrégularités dans les secteurs de MATAM et de SALDE consistant en un relèvement de la ligne d'eau d'autant plus accentué que la crue est plus importante. Cette singularité peut s'expliquer par la réduction importante du lit majeur au droit de ces 2 stations. On constate d'ailleurs que la partie la plus déprimée du profil, de NGUIGUILONE à DIORBIVOL, correspond au secteur de la Vallée où le lit majeur est le plus large. A l'aval de SALDE la forme du profil est très régulière.

Le profil en long des hauteurs maximales du DOUE (Gr III.15.) est très régulier sauf dans le secteur GUIA-confluent, où l'on observe une diminution très sensible de la pente pour les crues de fréquences inférieures à 25 %. Cela

# FRÉQUENCE DES HAUTEURS MAXIMALES A KAYES ET KIDIRA



# FREQUENCE DES HAUTEURS MAXIMALES DANS LA VALLÉE



Profil en long des hauteurs maximales de crue

Gr. III.14

Altitude IGN - 20 - DÉBI

5

10

5

KM 75

DIAOUAR

ROSSO

RICHARD-TOLL

DAGANA

PODOR

SERPOLI

BOGHÉ

DIOULDÉ - DIABÉ

SALDÉ

DIORBIVAL

KAÉDI

NGUIGUILONE

MATAM

OUAOUNDÉ

BAKEL

1%

10%

25%

50%

75%

90%

99%

Profil d'étiage absolu median

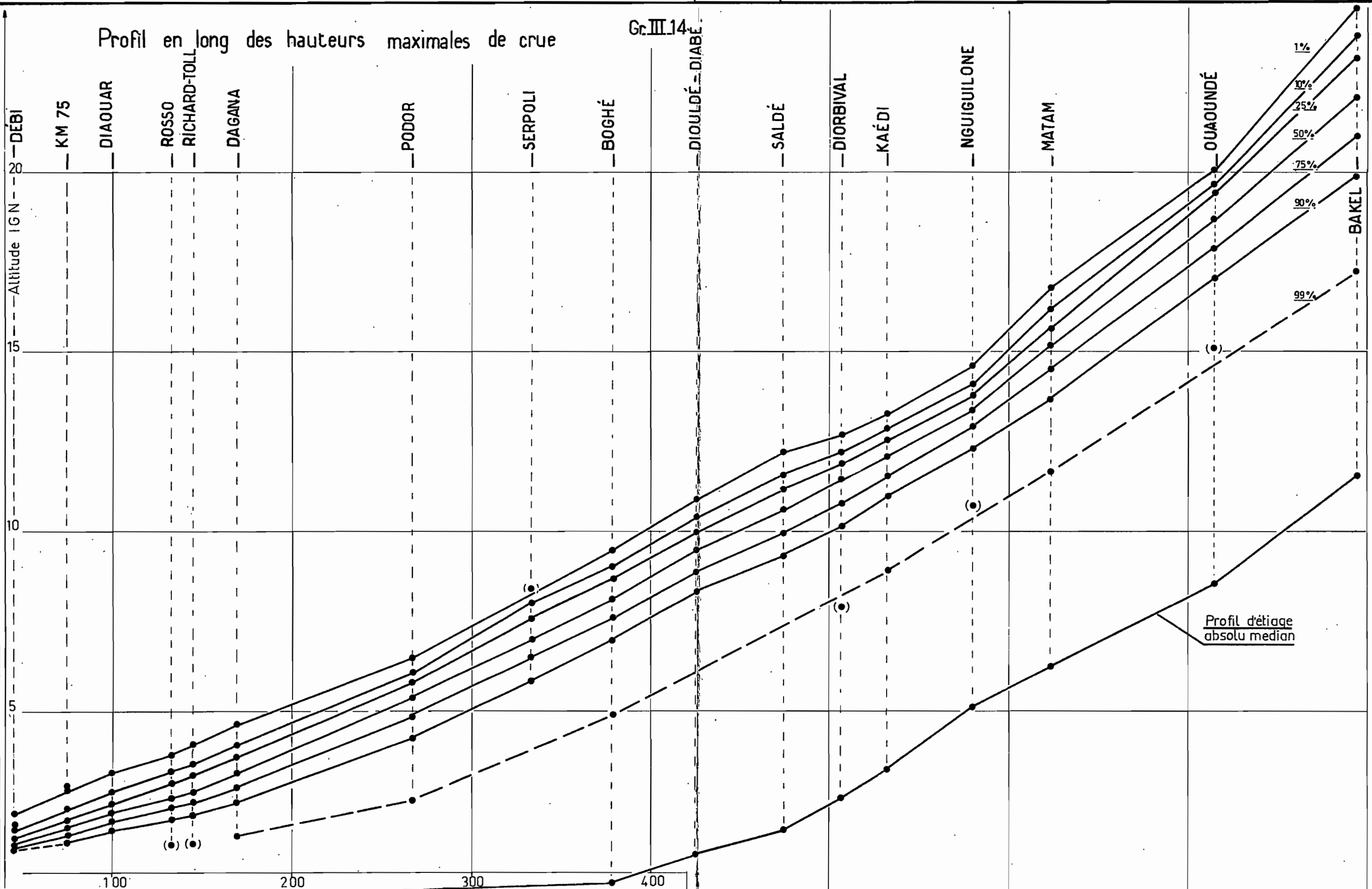


Tableau n° 3.6.

HAUTEURS MAXIMALES ANNUELLES DE DIVERSES FREQUENCES

A - Stations du HAUT BASSIN

Stations F %	BAFOULABE		GALOUGO		KAYES		AMBIDEDI		KIDIRA	
	Echelle:	IGN	Echelle:	IGN	Echelle:	IGN	Echelle:	IGN	Echelle:	IGN
0,5	(590)	(94,70)	(1170)	(80,93)	(1370)	(33,86)	(1250)	(30,17)	(1250)	(32,10)
1	570	94,50	1125	80,48	1330	33,46	1215	29,82	(1225)	(31,85)
2	555	94,35	1090	80,13	1290	33,06	1185	29,52	1200	31,60
5	525	94,05	1025	79,48	1220	32,36	1130	28,97	1150	31,10
10	500	93,80	965	78,88	1160	31,76	1085	28,52	1110	30,70
20	475	93,55	905	78,28	1085	31,01	1025	27,92	1050	30,10
25	465	93,45	885	78,08	1055	30,71	1000	27,67	1030	29,90
30	455	93,35	860	77,83	1025	30,41	980	27,47	1010	29,70
40	442	93,22	825	77,48	980	29,96	940	27,07	975	29,35
50	430	93,10	795	77,18	935	29,51	895	26,62	940	29,00
60	415	92,95	755	76,78	885	29,01	845	26,12	900	28,60
70	400	92,80	715	76,38	835	28,51	795	25,62	860	28,20
75	390	92,70	690	76,13	805	28,21	765	25,32	830	27,90
80	380	92,60	670	75,93	775	27,91	740	25,07	800	27,60
90	355	92,35	600	75,23	685	27,01	650	24,17	715	26,75
95	335	92,15	545	74,68	605	26,21	570	23,37	625	25,85
98	305	91,85	465	73,88	510	25,26	475	22,42	(510)	(24,70)
99	(285)	(91,65)	(415)	(73,38)	445	24,61	(410)	(21,77)	(425)	(23,85)
99,5	(260)	(91,40)	(350)	(72,73)	(375)	(23,91)	(345)	(21,12)		

Tableau n° 3.6. (suite)

E : Stations principales de la Vallée

Stations F %	BAKEL		MATAM		KAEDI		BOGHE (1)		PODOR		DAGANA	
	Echelle	IGN	Echelle	IGN	Echelle	IGN	Echelle	IGN	Echelle	IGN	Echelle	IGN
0,5	1365	:24,81:	1065	:16,97:	955	:13,40:	1015	:9,58:	705	:6,61:	(515)	:(471):
1	1345	:24,61:	1050	:16,82:	945	:13,30:	1005	:9,48:	695	:6,51:	505	:461:
2	1327	:24,43:	1040	:16,72:	935	:13,20:	995	:9,38:	690	:6,46:	493	:449:
5	1295	:24,11:	1010	:16,42:	920	:13,05:	980	:9,23:	675	:6,31:	475	:431:
10	1262	:23,78:	985	:16,17:	900	:12,85:	963	:9,06:	655	:6,11:	455	:411:
20	1215	:23,31:	950	:15,82:	880	:12,65:	934	:8,77:	635	:5,91:	430	:386:
25	1200	:23,16:	940	:15,72:	870	:12,55:	925	:8,68:	625	:5,81:	420	:376:
30	1180	:22,96:	925	:15,57:	860	:12,45:	913	:8,56:	615	:5,71:	412	:368:
40	1140	:22,56:	905	:15,37:	840	:12,25:	893	:8,36:	595	:5,51:	395	:351:
50	1095	:22,11:	885	:15,17:	825	:12,10:	871	:8,14:	580	:5,36:	380	:336:
60	1060	:21,76:	860	:14,92:	805	:11,90:	851	:7,94:	565	:5,21:	363	:319:
70	1010	:21,26:	835	:14,67:	785	:11,70:	830	:7,73:	542	:4,98:	346	:302:
75	985	:21,01:	820	:14,52:	770	:11,55:	817	:7,60:	530	:4,86:	335	:291:
80	960	:20,76:	805	:14,37:	755	:11,40:	803	:7,46:	515	:4,71:	322	:278:
90	875	:19,91:	740	:13,72:	705	:10,90:	756	:6,99:	470	:4,26:	290	:246:
95	790	:19,06:	680	:13,12:	645	:10,30:	695	:6,38:	420	:3,76:	260	:216:
98	675	:17,91:	590	:12,22:	570	:9,55:	613	:5,56:	350	:3,06:	225	:181:
99	610	:17,26:	525	:11,57:	510	:8,95:	550	:4,93:	300	:2,56:	200	:156:
99,5	550	:16,66:	460	:10,92:	455	:8,40:	500	:4,43:	250	:2,06:	(180)	:(136):

- 20 -

(1) Ces caractéristiques correspondent aux conditions actuelles (les données antérieures à 1956 ont été corrigées après estimation de la surélévation du plan d'eau due à la digue BOGHE-BOGHE N'DAW).

Tableau n° 3.7.

HAUTEURS MAXIMALES ANNUELLES DE DIVERSES FREQUENCES

A - Stations secondaires de la Vallée

Stations F %	OUAOUNDE		NGUIGUILONE		DIORBIVOL		SALDE		DIOULDE DIABE		SERPOLI	
	Echelle	IGN	Echelle	IGN	Echelle	IGN	Echelle	IGN	Echelle	IGN	Echelle	IGN
0,5												
1	(1162)	(20,10)	(1052)	(14,59)	(1057)	(12,69)	(1092)	(12,24)	(1137)	(10,96)	(921)	(3,41)
2	1153	20,01	(1045)	(14,52)	(1046)	(12,58)	1078	12,10	(1125)	(10,84)	(910)	(3,30)
5	1136	19,84	1022	14,29	1030	12,42	1055	11,87	1105	10,64	(895)	(3,15)
10	1120	19,68	1004	14,11	1008	12,20	1027	11,59	1080	10,39	877	7,97
20	1097	19,45	978	13,85	986	11,98	999	11,31	1055	10,14	847	7,67
25	1089	19,37	970	13,77	975	11,87	985	11,17	1043	10,02	838	7,58
30	1079	19,27	960	13,67	965	11,77	972	11,04	1031	9,90	825	7,45
40	1057	19,05	945	13,52	943	11,55	947	10,79	1009	9,68	805	7,25
50	1023	18,71	930	13,37	927	11,39	925	10,57	992	9,51	782	7,02
60	997	18,45	911	13,18	905	11,17	905	10,37	971	9,30	761	6,81
70	960	18,08	893	13,00	884	10,96	880	10,12	949	9,08	739	6,59
75	941	17,89	881	12,88	868	10,80	863	9,95	934	8,93	725	6,45
80	922	17,70	870	12,77	851	10,63	848	9,80	921	8,80	711	6,31
90	(858)	(17,06)	(825)	(12,32)	803	10,15	802	9,34	(880)	(8,39)	(662)	(5,82)
95	(795)	(16,43)	(778)	(11,85)	(745)	(9,57)	(750)	(8,82)	(835)	(7,94)	(600)	(5,20)
98	(708)	(15,56)	(711)	(11,18)	(670)	(8,82)	(690)	(8,22)	(780)	(7,39)	(515)	(4,35)
99	(660)	(15,08)	(665)	(10,72)	(610)	(8,22)						
99,5												

Tableau n° 3.7. (suite) . -

B-- Stations d'altitude

Stations F %	RICHARD-TOLL		ROSSO		DIAOUAR	KM 75	M'NEOU
	Echelle:	IGN	Echelle:	IGN	IGN	IGN	IGN
0,5	(448)	(408)	(408)	(385)	(3,40)	2,89	2,26
1	(439)	(399)	(400)	(377)	3,29	2,78	2,17
2	427	387	390	367	3,15	2,66	2,06
5	410	370	372	349	2,95	2,47	1,90
10	391	351	355	332	2,73	2,26	1,72
20	367	327	332	309	2,45	2,00	1,49
25	358	318	323	300	2,39	1,96	1,46
30	350	310	317	294	2,35	1,92	1,43
40	334	294	303	280	2,25	1,84	1,37
50	320	280	290	267	2,17	1,76	1,32
60	306	266	280	257	2,07	1,68	1,27
70	293	253	265	242	1,98	1,60	1,21
75	284	244	256	233	1,92	1,55	
80	274	234	245	222	1,84	1,49	
90	(248)	(208)	(223)	(200)	1,66	1,33	
95	(224)	(184)	(200)	(177)	1,50		
98	(196)	(156)	(170)	(147)			
99	(176)	(136)	(155)	(132)			
99,5	(160)	(120)	(140)	(117)			

Tableau n° 3.7. (suite)

C - Stations du DOUE

Stations F %	NGOUI		MADINA		GUEDE		GUIA
	Echelle	IGN	Echelle	IGN	Echelle	IGN	IGN
0,5					(791)	(7,28)	(6,44)
1	(1246)	(12,01)	(1098)	(10,48)	(785)	(7,22)	(6,36)
2	(1233)	(11,88)	(1087)	(10,37)	781	7,18	(6,31)
5	(1211)	(11,66)	1070	10,20	771	7,08	(6,19)
10	1185	11,40	1048	9,98	757	6,94	6,02
20	1159	11,14	1027	9,77	743	6,80	5,86
25	1146	11,01	1017	9,67	736	6,73	5,79
30	1133	10,88	1007	9,57	729	6,66	5,71
40	1110	10,65	988	9,38	716	6,53	5,56
50	1092	10,47	971	9,21	705	6,42	5,45
60	1070	10,25	956	9,06	695	6,32	5,36
70	1047	10,02	937	8,87	679	6,16	5,23
75	1031	9,86	924	8,74	671	6,08	5,16
80	1017	9,72	912	8,62	660	5,97	5,08
90	974	9,29	(876)	(8,26)	631	5,68	(4,85)
95	(922)	(8,77)	(835)	(7,85)	600	5,37	
98	(865)	(8,20)			(555)	(4,92)	
99					(520)	(4,57)	

s'explique par le tracé très sinueux du DOUE dans ce secteur et par le fait que le niveau du SENEGAL y est supérieur à celui du DOUE.

Si on compare les hauteurs maximales atteintes par le SENEGAL et le DOUE dans un même profil en travers de la Vallée (tableau n° 3.8.); on constate qu'elles sont pratiquement identiques pour la crue médiane. Lors des crues faibles, les hauteurs maximales du DOUE sont supérieures à celles du SENEGAL. L'inverse se produit lors des fortes crues. Dans les 2 cas, les écarts croissent assez sensiblement de l'amont vers l'aval.

Tableau n° 3.8.

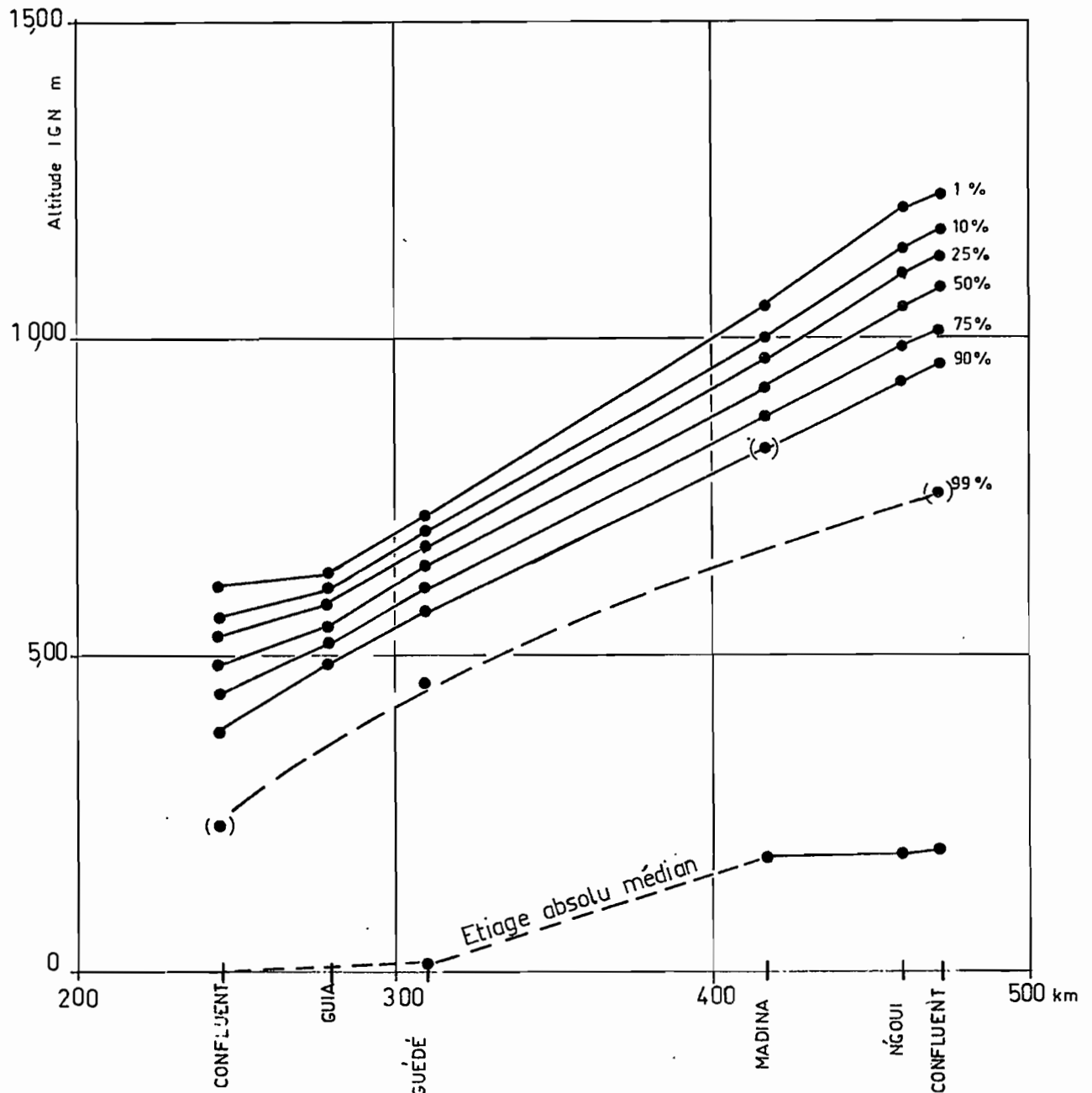
HAUTEURS MAXIMALES COMPAREES DU SENEGAL ET DU DOUE (ALTITUDES IGN)

	DOUE	SENEGAL	DOUE	SENEGAL	DOUE	SENEGAL	DOUE	SENEGAL
F %	NGOUI	KM 471	MADINA	KM 414	GUEDE	KM 303	GUIA	KM 270
1	12,01	12,16	(10,48)	(10,61)	(7,22)	7,55	(6,36)	6,60
10	11,40	11,52	9,98	10,07	6,94	7,12	6,02	6,19
25	11,01	11,10	9,67	9,70	6,73	6,78	5,79	5,89
50	10,47	10,51	9,21	9,18	6,42	6,26	5,45	5,44
75	9,86	9,89	8,74	8,61	6,08	5,73	5,16	4,93
90	9,29	9,28	(8,26)	8,05	5,68	5,11	(4,85)	4,33

On serait tenté d'en déduire que les échanges au travers de l'Ile à MORPHIL, lors des fortes crues, se font dans le sens SENEGAL-DOUE. En réalité l'Ile à MORPHIL présente un réseau hydrographique tel que les échanges s'effectuent dans le sens DOUE-SENEGAL.

Les profils obtenus sont suffisamment détaillés pour qu'on puisse interpoler les hauteurs maximales entre les différentes stations sans risquer des erreurs excédant 10-20 cm.

## Profil en long des hauteurs maximales du DOUÉ



La caractéristique la plus importante d'une crue étant sa hauteur maximale (ou son débit maximal) il est fréquent d'adopter pour fréquence d'une crue, celle de son maximum annuel. Cette définition n'offre guère d'intérêt dans la Vallée étant donné que la hauteur maximale, pour une crue déterminée voit sa fréquence varier de l'amont vers l'aval. Ces variations sont parfois assez importantes comme le montrent les 2 exemples ci-dessous qui correspondent à 2 formes opposées d'évolution de la fréquence.

VARIATIONS DE LA FREQUENCE DES MAXIMUMS EN 1955 ET 1958

Fréquences en %

Années	BAKEL	MATAM	KAEDI	BOGHE	PODOR	DAGANA
1955	36	29	25	25	18	18
1958	6	10	10	17	14	13

Cet inconvénient est pratiquement supprimé si on adopte, pour fréquence de la crue, celle de la hauteur moyenne de la partie supérieure de son limnigramme. On a vu, au chapitre Révalorisation des relevés (2ème partie, Tome 2), l'existence d'étroites corrélations entre ces hauteurs moyennes pour les différentes stations de la Vallée, en particulier pour le couple BAKEL-DAGANA. Rappelons qu'à BAKEL la hauteur moyenne conduisant aux meilleurs résultats est la hauteur moyenne maximale prise dans un intervalle de 40 jours et qu'à DAGANA, on peut se contenter de prendre comme paramètre la hauteur maximale. Il est donc préférable, lorsqu'on étudie un phénomène qui intéresse l'ensemble de la Vallée et pour lequel l'importance de la crue intervient, d'adopter cette définition de la fréquence, dont la valeur est pratiquement indépendante de la station où la crue est observée. Remarquons que cela revient à assimiler la fréquence de la crue à celle du maximum atteint aux stations de la basse Vallée (PODOR et DAGANA).

La fréquence de la crue applicable à toute la Vallée et définie par rapport au limnigramme de BAKEL est donnée par le tableau ci-dessous.

FREQUENCES DES HAUTEURS MOYENNES MAXIMALES DE 40 JOURS A BAKEL

=====		
F %	Hauteurs moy-max 40 jours à BAKEL	
	Echelle (cm)	IGN (m)
-----		
1	1230	23,46
5	1180	22,96
10	1145	22,61
25	1065	21,81
50	960	20,76
75	840	19,56
90	720	18,36
95	640	17,56
99	490	16,06
=====		

### I.3. - Etude des étiages

#### I.3.1. Courbes de tarissement

Aux stations du Haut-Bassin, l'étude du tarissement considéré du point de vue des hauteurs limnimétriques n'offre pas d'intérêt particulier et nous ne présenterons dans ce paragraphe que les résultats relatifs aux stations de la Vallée.

A BAKEL, la décrue s'amorce très rapidement dès le début d'Octobre en général. A DAGAMA, elle se fait sentir de façon plus progressive à la fin d'Octobre ou au début de Novembre. Ce n'est cependant qu'à partir de la mi-Décembre que, dans toute la Vallée, on peut assimiler la baisse du niveau des eaux à une courbe de tarissement régulière ayant l'allure d'une exponentielle négative. Avant cette date, la vitesse de décrue, pour un niveau donné, dépend assez sensiblement de la hauteur et de la durée du maximum précédent, car cette première baisse résulte de la vidange des eaux accumulées dans le lit majeur, dont la submersion a été plus ou moins complète. Le véritable tarissement, qui correspond à un écoulement d'origine presque uniquement souterraine, ne commence pratiquement qu'en Décembre. On dispose pour son étude des données relatives à la période 1951-1965.

A BAKEL, les différentes courbes de tarissement, pendant cette période, sont pratiquement superposables par une simple translation parallèle à l'axe des temps. On a pu ainsi établir que la hauteur correspondant au début du tarissement est de 280 à cette station, et tracer une courbe moyenne qui permet, à quelques centimètres près, de prévoir en Décembre, la hauteur d'eau qui sera atteinte le 1er Mai suivant (sauf pluies exceptionnellement précoces). On relève en 15 ans, 4 cas de précipitations survenant au cours du tarissement, 3 correspondant à des précipitations se produisant en Décembre, et 1 à des précipitations se produisant en Avril. Les précipitations se produisant au début de la période de tarissement n'ont qu'une action momentanée sur le niveau. La décroissance redevient normale dans un délai de 15 jours après l'arrêt des précipitations.

La courbe moyenne de tarissement à BAKEL est formée de 2 courbes exponentielles successives :

$$H = H_0 e^{-0,0091 t}$$

(H en cm,  
t en jours).

pour  $125 < H < 280$

$$\text{et } H = H_0 e^{-0,0129 t}$$

pour  $H < 125$

Etant donné que les relevés de basses eaux aux autres stations de la Vallée comportent des lacunes assez importantes et que le calage des éléments inférieurs des échelles est assez souvent défectueux, on a préféré pour déterminer les courbes de tarissement à ces stations, utiliser les corrélations liant leurs hauteurs d'eau à celles de BAKEL. Ces corrélations, établies uniquement d'après les relevés dont nous étions sûrs, notamment ceux de la période 1961-1964, sont très étroites et tendent en très basses eaux vers des relations fonctionnelles.

Les hauteurs d'eau calculées à intervalles de 30 jours depuis le début du tarissement, pour les diverses stations de la Vallée, sont données par le tableau n° 3.9. qui exprime par la même occasion les corrélations précédentes. Les courbes moyennes de tarissement sont présentées par le graphique n° III.16.

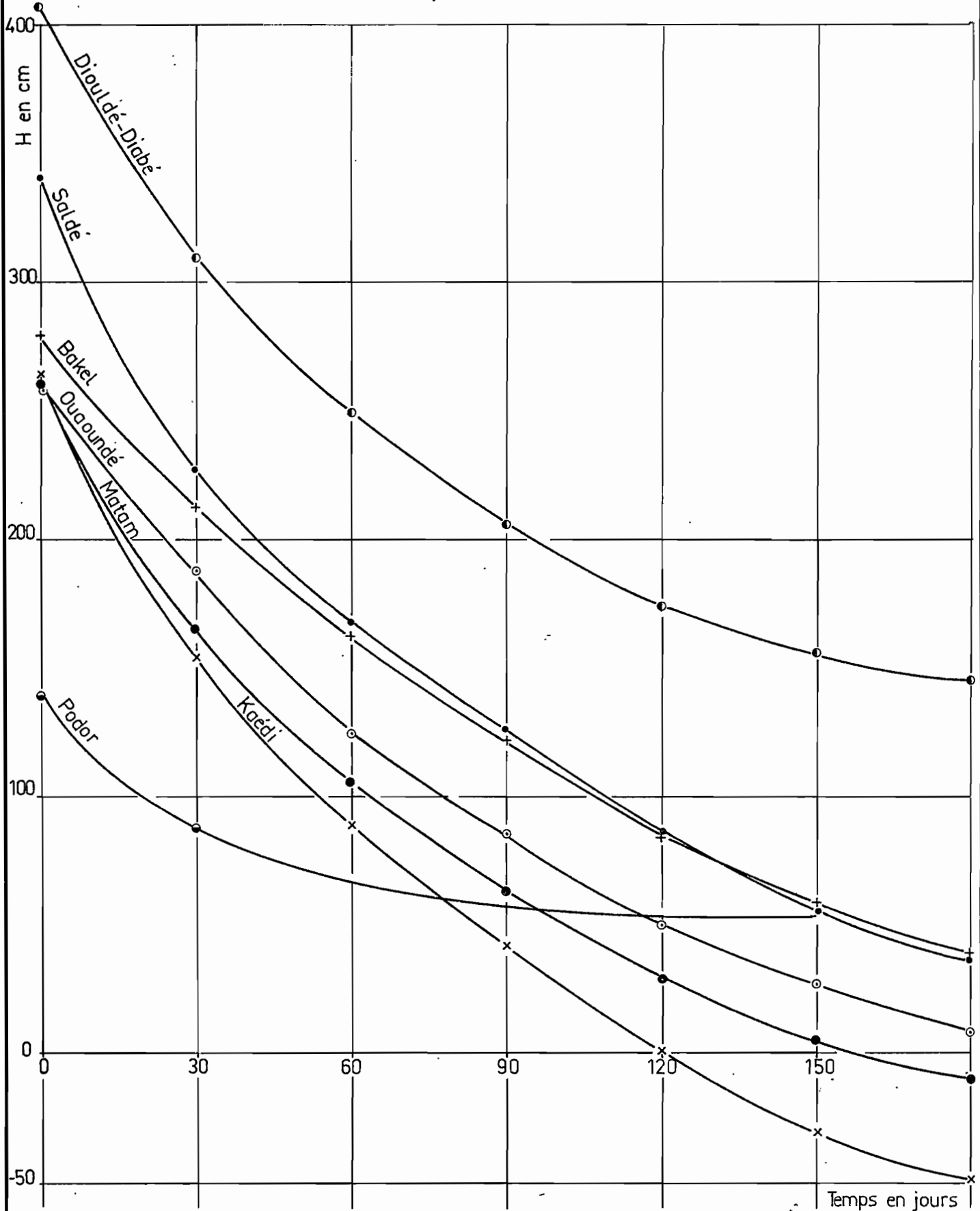
A cause de l'influence de la marée, la durée moyenne pendant laquelle on peut observer le tarissement est réduite à 2 mois  $\frac{1}{2}$  à BOGHE et à 15 jours à MODOR. A DAGANA, le tarissement est presque totalement masqué par les oscillations de la marée.

### I.3.2. Etiage absolu

Les hauteurs d'étiage du SENEGAL ne sont observées

# Courbes moyennes de tarissement

Gr. III.16





que depuis 1951 ce qui ne permet pas de procéder à une étude statistique valable. Les stations de BAKEL, KAYES et KIDIRA sont d'ailleurs les seules où la série des valeurs observées soit à peu près complète. L'échantillon est encore plus réduit aux autres stations. Nous nous contenterons d'indiquer les valeurs médianes et extrêmes pour les stations suivantes.

HAUTEURS D'ETIAGE ABSOLU

Hauteurs d'étiage (cm)	KAYES	KIDIRA	BAKEL	MATAM	KAEDI
Maximale	66	49	84	14	-01
Médiane	38	26	43	-13	-50
Minimale	28	07	34	-19	-62

Les dates d'étiage absolu relevées aux mêmes stations se situent comme indiqué dans le tableau ci-après. On constate une certaine interdépendance entre les dates d'étiage du SENEGAL moyen et celles de la Vallée. Cette interdépendance est due au fait que la fin de l'étiage à BAKEL est déterminée le plus souvent par les premiers apports du BAFING et plus rarement par ceux de la FALEME. Quant à l'abondance de l'étiage à BAKEL, elle dépend essentiellement du BAFING, comme nous le verrons au chapitre consacré à l'étude des débits.

DATES DE L'ETIAGE

	KAYES	KIDIRA	BAKEL	MATAM	KAEDI
Date médiane	27/5	6/6	3/6	10/6	14/6
Dates extrêmes	6/5	21/5	3/5	5/5	6/5
	14/6	24/6	17/6	15/6	22/6

#### I.4. - Hauteurs caractéristiques

On désigne par "hauteurs caractéristiques" les hauteurs limnimétriques qui, pour une année donnée, ont été atteintes ou dépassées pendant diverses durées : 10 jours, 1 mois, 3 mois, etc...

Leur détermination année par année, et station par station, ainsi que l'étude de leur distribution statistique ne présentent d'intérêt que pour la Vallée à cause de l'existence du lit majeur et de ses possibilités d'exploitation hydro-agricole. L'étude de ces dernières nécessite en particulier des données sur la durée, l'étendue et la fréquence des submersions du lit majeur. Les données que nous allons présenter concernent en fait uniquement le lit mineur, et il conviendra, pour déterminer celles relatives à une zone donnée du lit majeur, d'établir, à l'aide d'observations simultanées effectuées dans cette zone et à la station de référence correspondante du lit mineur, les corrélations liant leurs hauteurs caractéristiques respectives.

Pour les projets hydro-agricoles, les données les plus utiles concernent les submersions de durées inférieures à 2 mois. Nous en avons tenu compte et avons développé particulièrement la détermination des hauteurs caractéristiques dans cet intervalle.

Compte tenu des autres applications possibles (navigation, pompage pour l'irrigation) les données ont été étendues à des durées supérieures à 2 mois. La consistance des relevés anciens limite toutefois leur détermination, suivant les stations, à des durées comprises entre 4 et 6 mois.

Le report graphique des hauteurs caractéristiques de la période 1903-1964, en fonction de leur fréquence au dépassement, permet, comme pour les hauteurs maximales, d'ajuster une courbe expérimentale de fréquence pour chacune des stations principales de la Vallée et pour les diverses durées considérées.

Nous avons relevé sur les différentes courbes d'ajustement les hauteurs caractéristiques correspondant à diverses fréquences et rassemblé ces données par station dans

les tableaux n° 3.10. à 3.15. (données exprimées en hauteurs aux échelles). En vue des applications ces données sont présentées sous forme de graphiques ou sont tracées par station les courbes hauteurs-durées relatives à diverses fréquences (Gr n° III.17. à III.22.).

Les résultats précédents concernant les stations principales s'étendent aux stations secondaires de la Vallée ; en utilisant les corrélations liant leurs hauteurs caractéristiques respectives. Ces corrélations ont été établies pour des durées successives d'intervalle 30 jours et conduisant aux équations de régression présentés par les tableaux n° 3.16. à 3.21.

Les hauteurs caractéristiques aux stations secondaires sont rassemblées dans les tableaux n° 3.22. à 3.30. Les valeurs ayant nécessité une extrapolation de la régression figurent entre parenthèses.

Tableau n° 3.10.

HAUTEUR CARACTERISTIQUES DU SENEGAL A BAKEL

(en cm)

Frequence :	H :	H :	H :	H :	H :	H :	H :	H :	H :	H :	H :
% :	MAX :	15 j :	30 j :	40 j :	50 j :	60 j :	90 j :	120 j :	150 j :	180 j :	
0,5 :	(1365) :	(1295) :	(1235) :	(1185) :	(1110) :	(1025) :	(715) :	(510) :	(395) :	(320) :	
1 :	1345 :	1280 :	1210 :	1165 :	1090 :	1005 :	700 :	500 :	385 :	312 :	
2 :	1327 :	1255 :	1185 :	1140 :	1065 :	985 :	680 :	490 :	375 :	305 :	
5 :	1295 :	1220 :	1145 :	1095 :	1020 :	940 :	650 :	475 :	365 :	295 :	
10 :	1262 :	1175 :	1105 :	1050 :	975 :	895 :	620 :	455 :	350 :	285 :	
20 :	1215 :	1130 :	1040 :	990 :	905 :	830 :	585 :	430 :	330 :	265 :	
25 :	1200 :	1110 :	1015 :	960 :	880 :	805 :	570 :	420 :	322 :	260 :	
30 :	1180 :	1085 :	985 :	930 :	855 :	780 :	555 :	410 :	315 :	255 :	
40 :	1140 :	1040 :	940 :	885 :	810 :	735 :	530 :	390 :	305 :	240 :	
50 :	1095 :	995 :	895 :	845 :	770 :	695 :	505 :	375 :	290 :	230 :	
60 :	1060 :	950 :	855 :	800 :	730 :	660 :	475 :	355 :	280 :	220 :	
70 :	1010 :	905 :	810 :	755 :	685 :	615 :	445 :	335 :	265 :	210 :	
75 :	985 :	875 :	780 :	725 :	660 :	590 :	430 :	325 :	257 :	202 :	
80 :	960 :	845 :	750 :	700 :	635 :	565 :	415 :	315 :	250 :	195 :	
90 :	875 :	760 :	675 :	625 :	560 :	505 :	375 :	290 :	230 :	180 :	
95 :	790 :	675 :	605 :	560 :	510 :	460 :	345 :	270 :	220 :	170 :	
98 :	675 :	590 :	530 :	495 :	465 :	420 :	320 :	255 :	205 :	160 :	
99 :	610 :	535 :	490 :	460 :	435 :	395 :	305 :	240 :	195 :	150 :	
99,5 :	(550) :	(490) :	(450) :	(430) :	(410) :	(375) :	(295) :	(230) :	(190) :	(145) :	

Tableau n° 3.11.

HAUT URS CARACTÉRISTIQUES DU SENEGAL A MATAM

(en cm)

Fréquence :	H :	H :	H :	H :	H :	H :	H :	H :	H :	H :
% :	MAX :	15 j :	30 j :	40 j :	50 j :	60 j :	90 j :	120 j :	150 j :	180 j :
0,5	1065	1035	1005	980	950	925	745	545	390	285
1	1050	1020	990	965	935	905	725	530	380	275
2	1040	1005	975	950	920	885	705	515	365	265
5	1010	980	950	925	890	855	675	490	350	255
10	985	955	925	900	860	825	650	465	330	240
20	950	925	895	865	825	790	610	435	310	225
25	940	915	880	850	805	770	595	425	300	220
30	925	900	865	835	795	755	580	415	295	210
40	905	875	845	815	770	725	555	395	280	200
50	885	855	825	790	745	700	530	375	265	190
60	860	830	800	765	720	670	505	355	250	175
70	835	805	770	735	690	640	475	330	235	160
75	820	790	750	715	670	620	455	315	225	150
80	805	770	730	695	650	600	435	305	215	145
90	740	710	670	630	580	535	390	270	190	125
95	680	640	610	570	525	485	345	245	175	110
98	590	555	530	490	455	420	300	220	155	95
99	525	490	465	435	405	370	275	200	140	90
99,5	460	425	405	380	355	325	250	190	135	85

Tableau n° 3.12.

HAUTEURS CARACTERISTIQUES DU SENEGAL A LAEDI

(en cm)

Fréquence :	H :	H :	H :	H :	H :	H :	H :	H :	H :	H :	H :
% :	MAX :	15 j :	30 j :	40 j :	50 j :	60 j :	90 j :	120 j :	150 j :	180 j :	
0,5	955	940	920	900	880	855	745	605	445	335	
1	945	930	910	890	870	845	730	585	425	320	
2	935	920	900	880	860	835	715	565	405	300	
5	920	905	885	865	840	815	690	530	375	275	
10	900	885	865	845	820	795	665	495	345	255	
20	880	865	845	820	795	765	635	455	315	230	
25	870	855	835	810	785	750	620	440	300	220	
30	860	845	825	800	775	740	605	425	290	210	
40	840	830	805	780	755	720	580	400	275	190	
50	825	810	785	760	735	700	550	375	255	175	
60	805	790	765	740	715	680	520	350	240	160	
70	785	770	745	720	690	650	490	325	225	145	
75	770	755	730	700	670	630	470	310	215	135	
80	755	740	715	685	655	615	445	295	205	130	
90	705	685	655	625	600	560	395	265	180	110	
95	645	630	600	570	545	505	350	240	160	95	
98	570	545	520	495	470	440	305	215	140	80	
99	510	485	460	440	420	390	275	200	130	75	
99,5	455	425	405	390	370	350	255	180	120	70	

Tableau n° 3.13.

HAUTEURS CARACTERISTIQUES DU SENEGAL A BOGHE  
 (Conditions actuelles)  
 (en cm)

Fréquence :	H :	H :	H :	H :	H :	H :	H :	H :	H :	H :	H :
% :	MAX :	15 j :	30 j :	40 j :	50 j :	60 j :	90 j :	120 j :	150 j :	180 j :	
-0,5	1015	1004	982	956	929	895	807	655	480	380	
1	1005	995	972	947	920	887	797	640	460	370	
2	995	985	962	936	911	879	785	620	440	350	
5	980	967	944	918	895	865	765	585	405	325	
10	963	950	927	901	877	850	742	550	375	300	
20	934	922	902	877	853	826	710	505	345	275	
25	925	910	891	867	843	814	695	490	330	265	
30	913	900	880	857	831	803	680	470	320	255	
40	893	881	861	838	811	781	650	440	305	240	
50	871	861	841	819	790	758	620	415	290	225	
60	851	841	820	797	767	732	580	390	275	210	
70	830	820	795	771	740	700	530	365	260	195	
75	817	806	780	753	723	680	510	350	255	190	
80	803	790	764	735	702	657	480	335	245	180	
90	756	741	700	673	640	586	420	305	225	165	
95	695	680	635	610	565	520	375	280	240	155	
98	613	600	555	520	490	440	335	255	190	140	
99	550	530	500	465	435	395	310	240	180	135	
99,5	500	480	450	420	390	360	290	225	175	130	

Tableau n° 3.14.

HAUTEURS CARACTERISTIQUES DU SENEGAL A PODOR

(en cm)

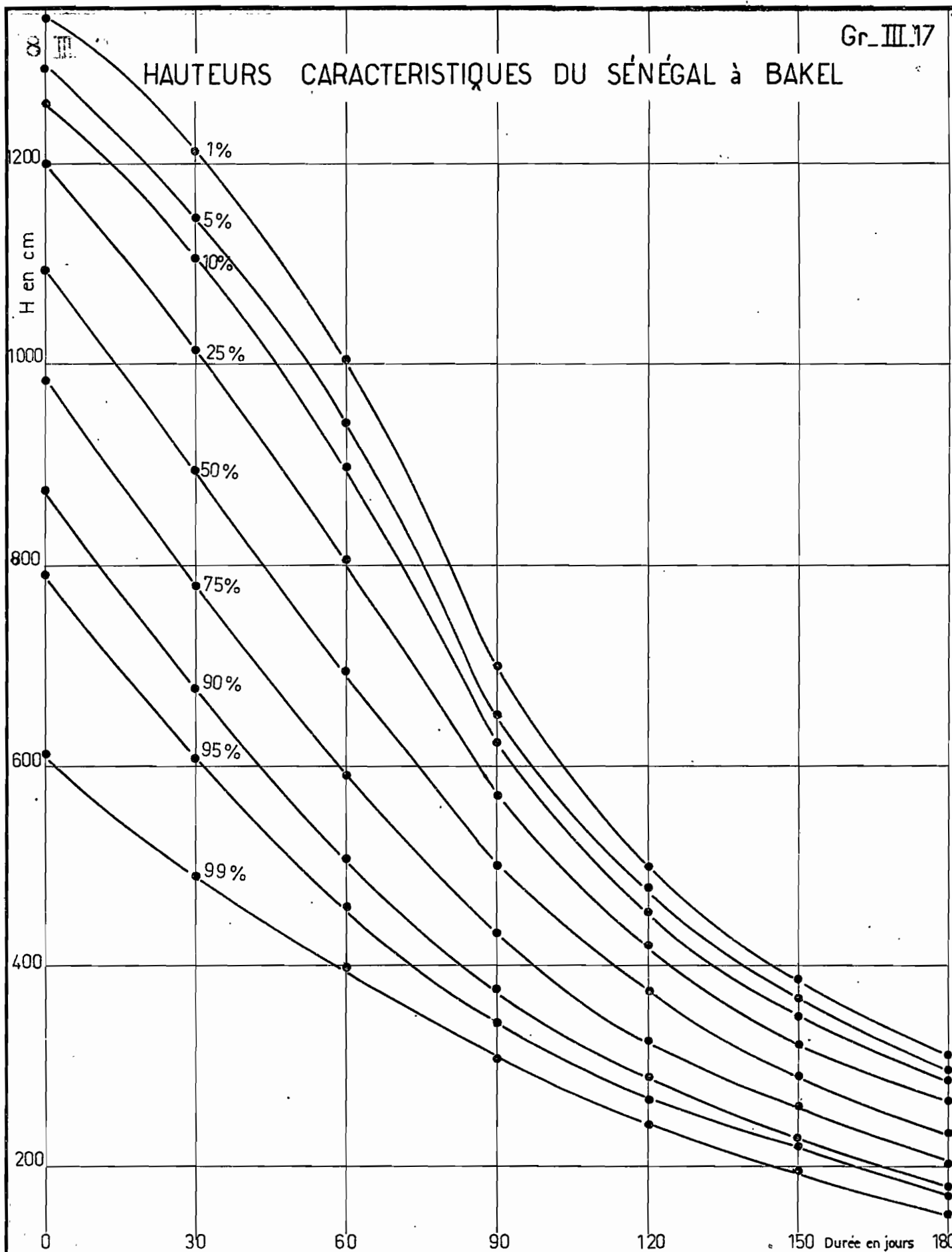
Fréquence :	H :	H :	H :	H :	H :	H :	H :	H :	H :
% :	MAX :	15 j :	30 j :	40 j :	50 j :	60 j :	90 j :	120 j :	
0,5	705	690	680	660	640	610	520	390	
1	695	685	670	650	630	600	510	380	
2	690	675	660	640	620	590	500	370	
5	675	660	650	625	605	575	485	350	
10	655	645	630	610	590	560	465	330	
20	635	625	610	590	570	540	440	300	
25	625	615	600	580	560	530	430	290	
30	615	605	590	570	550	520	420	280	
40	595	590	575	555	535	505	400	250	
50	580	575	555	535	515	485	380	240	
60	565	555	535	515	495	465	360	220	
70	542	530	510	490	470	440	325	195	
75	530	515	495	475	455	425	308	185	
80	515	500	480	460	440	410	290	175	
90	470	455	430	410	385	350	240	150	
95	420	405	375	355	335	300	195	130	
98	350	335	310	290	270	250	165	115	
99	300	285	265	240	225	215	145	110	
99,5	250	235	225	190	175	185	135	100	

Tableau n° 3.15.

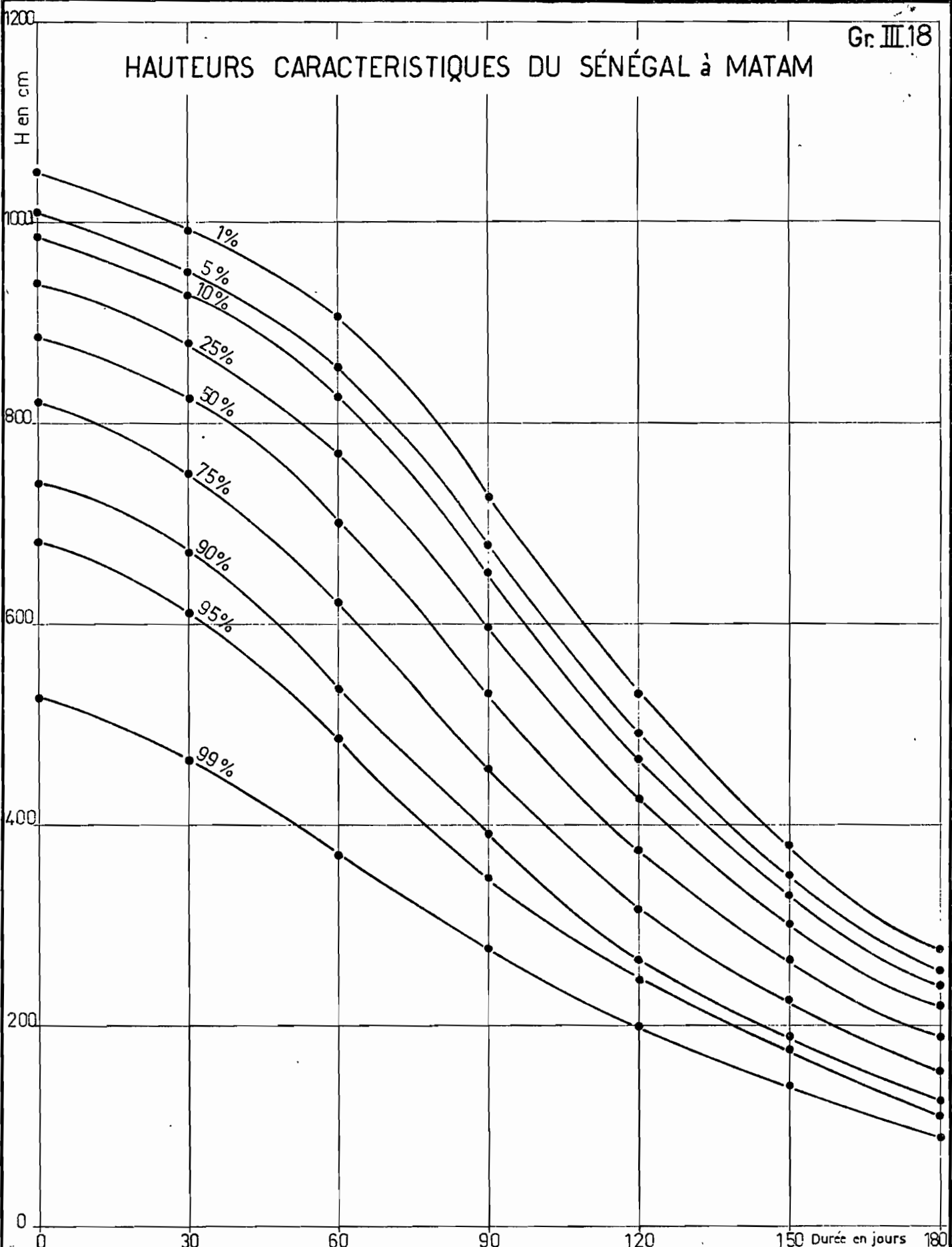
HAUTEURS CARACTERISTIQUES DU SENEGAL - DAGANA  
(en cm)

Fréquence %	H MAX	H 30 j	H 60 j	H 90 j	H 120 j
0,5	(515)	(490)	(425)	(350)	(255)
1	505	480	415	340	250
5	475	450	390	320	230
10	455	430	375	305	220
25	420	400	345	280	195
50	380	360	310	250	165
75	335	315	265	210	140
90	290	270	225	170	120
95	260	240	200	150	110
99	200	180	150	120	
99,5	(180)	(160)	(135)	(110)	

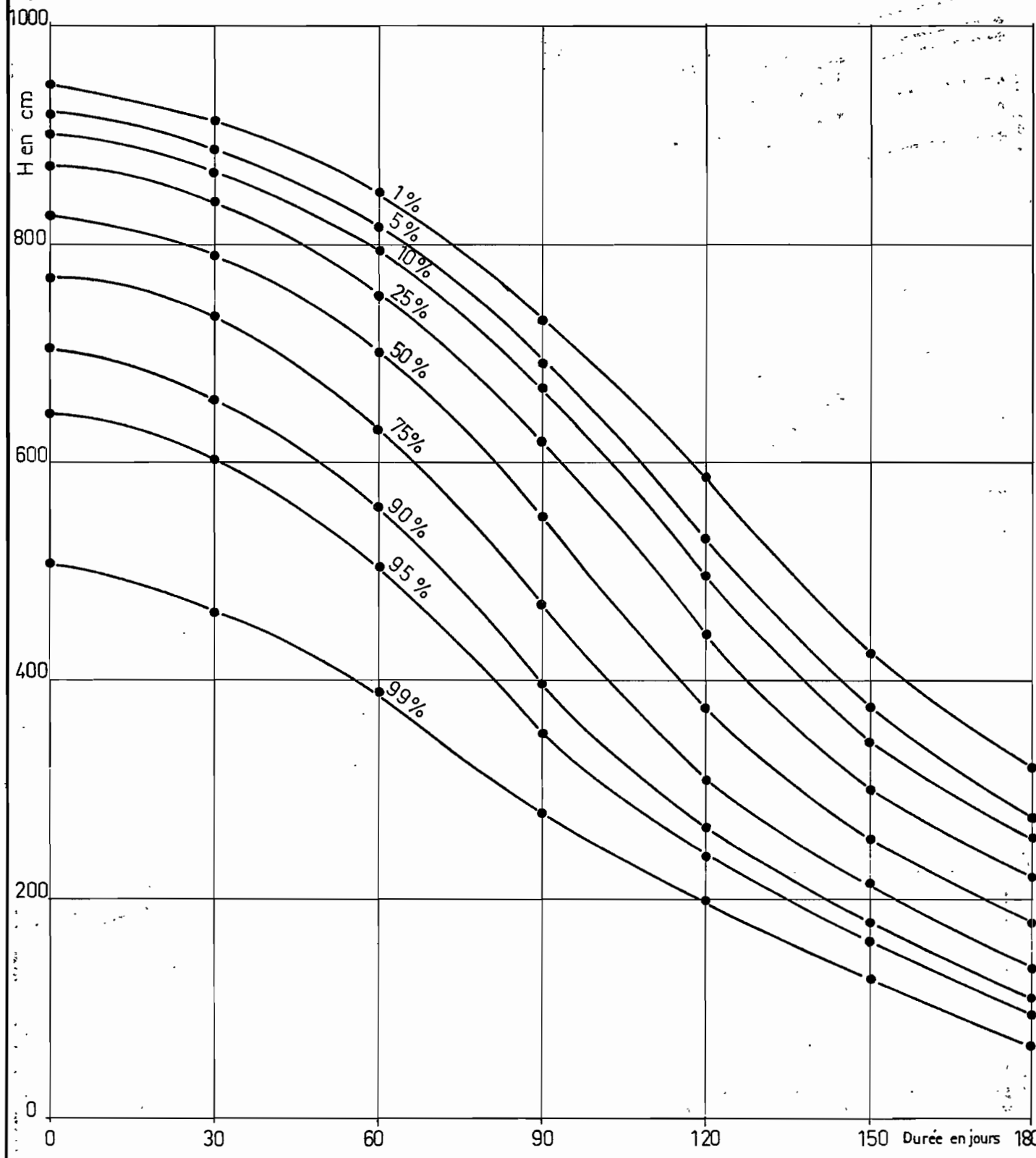
# HAUTEURS CARACTERISTIQUES DU SÉNÉGAL à BAKEL



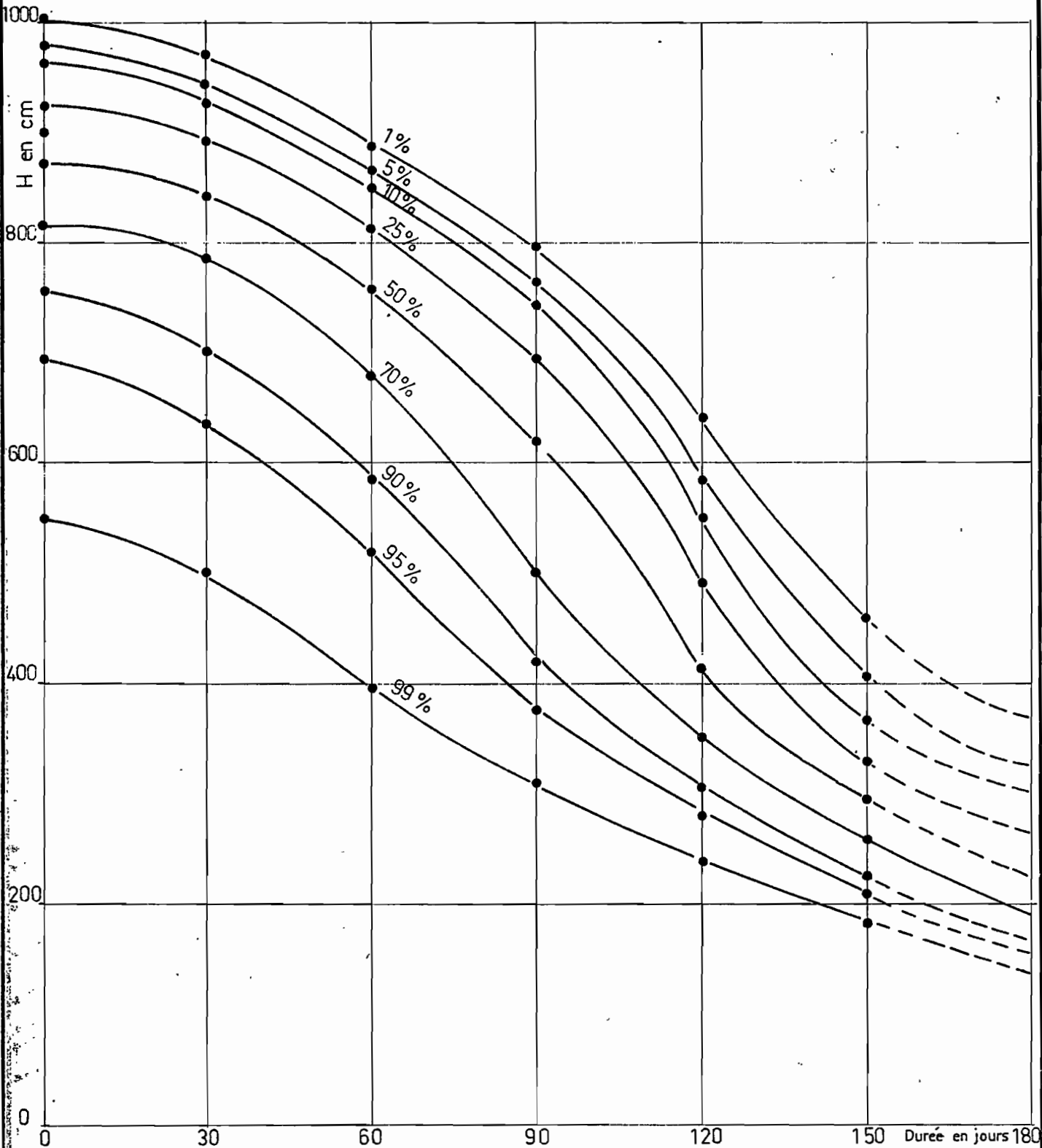
# HAUTEURS CARACTERISTIQUES DU SÉNÉGAL à MATAM



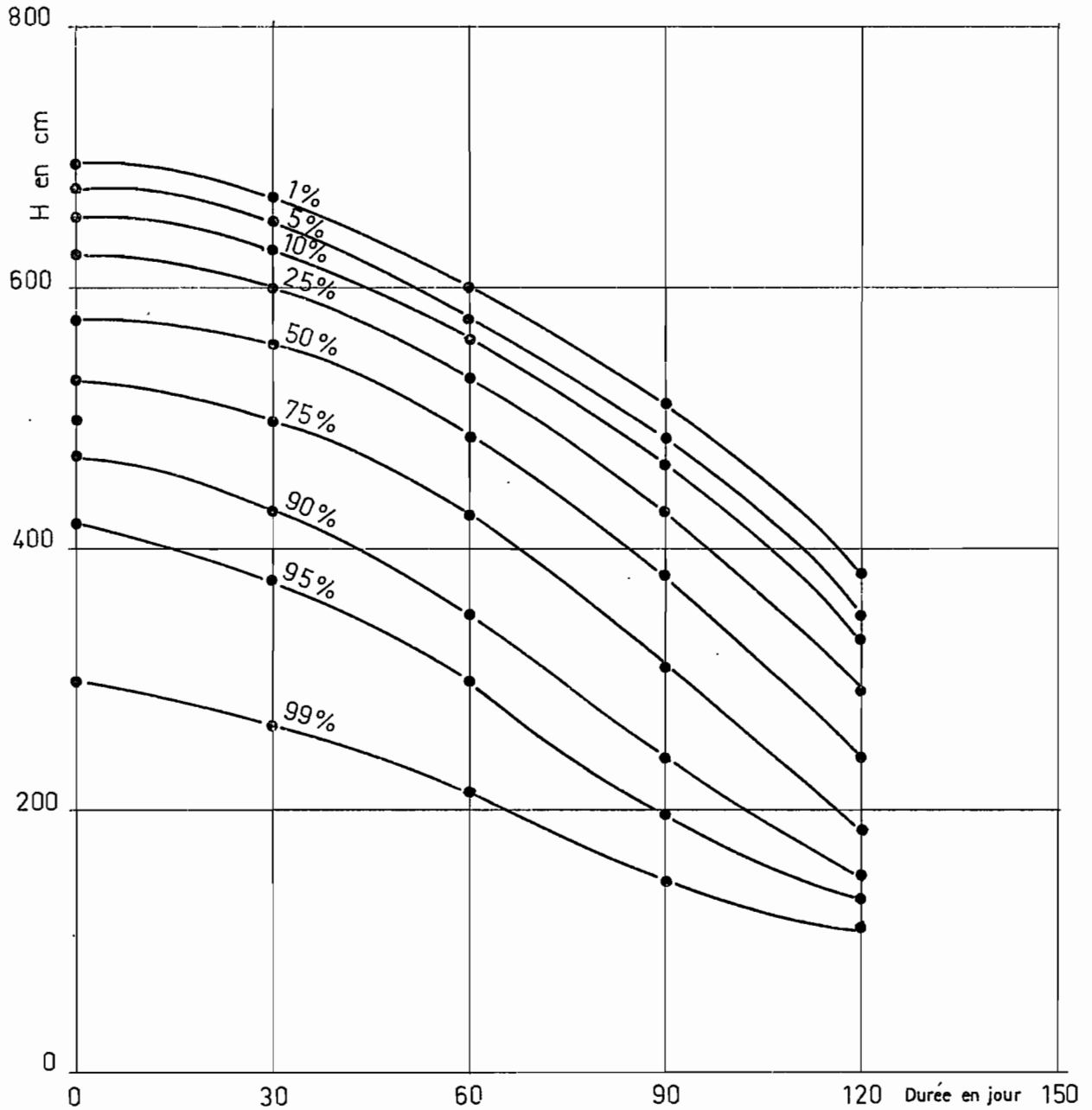
# HAUTEURS CARACTERISTIQUES DU SÉNÉGAL à KAÉDI



# HAUTEURS CARACTERISTIQUES DU SÉNÉGAL à BOGHÉ



## HAUTEURS CARACTERISTIQUES DU SÉNÉGAL à PODOR



## HAUTEURS CARACTERISTIQUES DU SÉNÉGAL à DAGANA

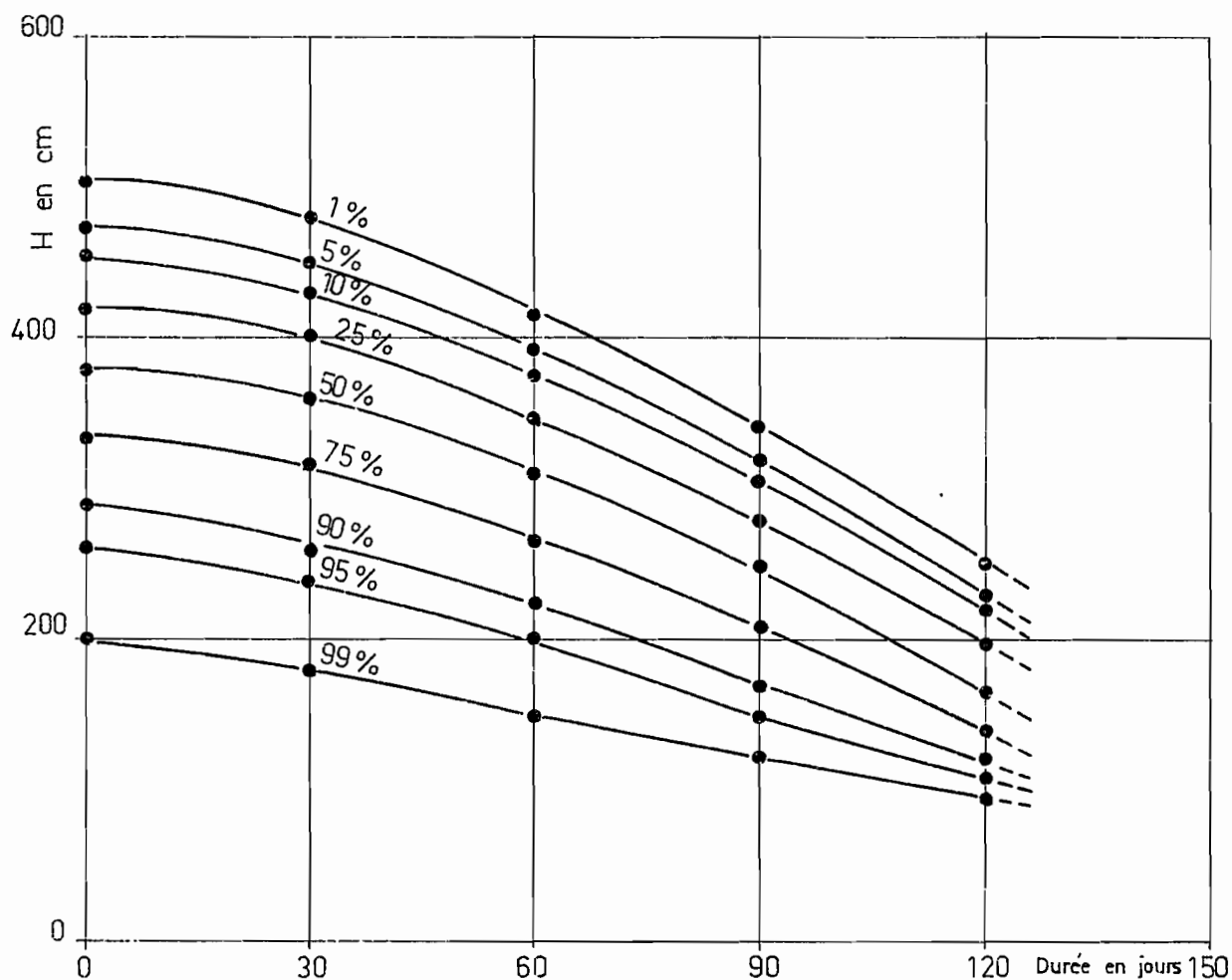


Tableau n° 3.16.

CORRELATIONS ENTRE LES HAUTEURS CARACTERISTIQUES 30 JOURS

Station secondaire (H <sub>c</sub> = Y)	Station de référence (H <sub>c</sub> = X)	Formule de régression
OUAOUNDE	BAKEL	Y = 0,86X + 144 (X ≤ 950) Y = 0,58X + 410 (X ≥ 950)
DIORBIVOL	KAEDI	Y = X + 100
SALDE	KAEDI	Y = 1,07X + 48
DILOULDE DIABE	BOGHE	Y = X + 112
SERPOLI	BOGHE	Y = 1,09X - 167
N'GOUI	SALDE	Y = 0,94X + 220
MADINA	SALDE	Y = 0,80X + 238
GUEDE	PODOR	Y = 0,60X + 356
ROSSO	DAGANA	Y = 0,71X + 3 (X ≤ 200) Y = 0,825X - 20 (X ≥ 200)

Tableau n° 3.17.

CORRELATIONS ENTRE LES HAUTEURS CARACTERISTIQUES 60 JOURS

Station secondaire (H <sub>c</sub> = Y)	Station de référence (H <sub>c</sub> = X)	Formule de régression
OUAOUNDE	BAKEL	Y = X + 42 (X ≤ 800) Y = 0,73X + 258 (X ≥ 800)
DIORBIVOL	KAEDI	Y = 0,99X + 112
SALDE	KAEDI	Y = 1,03X + 80
DILOULDE DIABE	BOGHE	Y = X + 100
SERPOLI	BOGHE	Y = 1,05X - 133
N'GOUI	SALDE	Y = 0,95X + 211
MADINA	SALDE	Y = 0,90X + 160
GUEDE	PODOR	Y = 0,89X + 228 (X ≤ 400) Y = 0,66X + 320 (X ≥ 400)
ROSSO	DAGANA	Y = 0,71X + 3 (X ≤ 200) Y = 0,825X - 20 (X ≥ 200)

Tableau n° 3.18.

CORRELATIONS ENTRE LES HAUTEURS CARACTERISTIQUES 90 JOURS

Station secondaire (H <sub>c</sub> = Y)	Station de référence (H <sub>c</sub> = X)	Formule de régression
OUAOUNDE	BAKEL	Y = 1,19X - 55
DIORBIVOL	KÆEDI	Y = 0,96X + 123
SALDE	KÆEDI	Y = 1,06X + 62
DIOULDE DIABE	BOGHE	Y = 0,95X + 150
SERPOLI	BOGHE	Y = 1,09X - 156
N'GOUI	SALDE	Y = 0,96X + 204
MADINA	SALDE	Y = 0,95X + 133
GUEDE	PODOR	{ Y = 0,97X + 198 (X ≤ 350) Y = 0,74X + 280 (X ≥ 350)
ROSO	DAGANA	{ Y = 0,71X + 3 (X ≤ 200) Y = 0,825X - 20 (X ≥ 200)

Tableau n° 3.19.

CORRELATIONS ENTRE LES HAUTEURS CARACTERISTIQUES 120 JOURS

Station secondaire (H <sub>o</sub> = Y)	Station de référence (H <sub>e</sub> = X)	Formule de régression
OUAOUNDE	BAKEL	Y = 1,21X - 75
DIORBIVOL	KAEDI	Y = 0,96X + 111
SALDE	KAEDI	Y = 1,10X + 70 (X ≤ 340) Y = 0,88X + 144 (X ≥ 340)
DIOULDE	BOGHE	Y = X + 118 (X ≤ 400)
DIABE		Y = 0,79X + 202 (X ≥ 400)
SERPOLI	BOGHE	Y = 1,10X - 150
N'GOUI	SALDE	Y = 0,97X + 198
MADINA	SALDE	Y = 1,05X + 101
GUEDE	LODOR	Y = 1,78X + 46 (X ≤ 200) Y = 0,82X + 238 (X ≥ 200)
ROSSO	DAGANA	Y = 0,71X + 3 (X ≤ 200) Y = 0,825X - 20 (X ≥ 200)

Tableau n° 3.20.

CORRELATIONS ENTRE LES HAUTEURS CARACTERISTIQUES 150 JOURS

Station secondaire (H <sub>c</sub> = Y)	Station de référence (H <sub>o</sub> = X)	Formule de régression
OUAOUNDE	BAKEL	Y = 1,50X - 164
DIORBIVOL	KAEDI	Y = X + 92
SALDE	KAEDI	Y = 0,93X + 88
DILOULDE DIABE	BOGHE	Y = 0,89X + 138
SERPOLI	BOGHE	Y = 0,96X - 80
N'GOUI	SALDE	Y = 0,98X + 194
MADINA	SALDE	Y = X + 126
GUEDE	SALDE	Y = 1,02X - 66



Tableau n° 3. 22.

HAUTEURS CARACTERISTIQUES DU SENEGAL A OUAOUNDE  
(en cm)

F %	MAX	1 mois	2 mois	3 mois	4 mois	5 mois	6 mois
0,5		(1126)	(1006)	(795)	(542)	(428)	(307)
1	(1162)	(1111)	(992)	(778)	(530)	(413)	(298)
5	1136	(1074)	944	719	(500)	384	277
10	1120	1050	911	683	476	361	265
25	1089	1000	845	623	433	319	234
50	1023	914	737	546	379	272	198
75	941	815	632	457	(318)	230	163
90	(858)	(725)	(547)	(391)	(276)	(200)	(140)
95	(795)	(665)	(502)	(356)	(252)	(185)	(130)
99	(660)	(565)	(437)	(308)	(215)	(160)	(110)
99,5		(530)	(417)	(296)	(203)	(150)	(105)

Tableau n° 3. 23.

HAUTEURS CARACTERISTIQUES DU SENEGAL A DIORBIVOL

(en cm)

F %	MAX	1 mois	2 mois	3 mois	4 mois	5 mois	6 mois
0,5		(1020)	(958)	(838)	(692)	(537)	430
1	(1057)	(1010)	(948)	(824)	(673)	(517)	415
5	1030	985	919	785	(620)	467	370
10	1008	965	899	761	(586)	437	350
25	975	935	855	718	533	392	315
50	927	885	805	651	471	347	270
75	868	830	736	574	409	307	230
90	803	755	666	(502)	365	272	205
95	(745)	700	(612)	(459)	(341)	(250)	190
99	(610)	(560)	(500)	(387)	(303)	(220)	170
99,5		(505)	(460)	(368)	(284)	(210)	165

Tableau n° 3. 25

HAUTEURS CARACTERISTIQUES DU SENSAL A SALDE

(en cm)

F %	MAX	1 mois	2 mois	3 mois	4 mois	5 mois	6 mois
0,5		(1032)	(960)	(852)	(676)	(501)	(392)
1	(1092)	(1022)	(950)	(836)	(659)	(483)	(378)
5	1055	995	920	793	610	437	337
10	1027	974	900	767	580	409	319
25	985	941	853	719	531	367	286
50	925	888	801	645	474	325	245
75	863	829	729	560	411	288	208
90	802	749	657	480	362	255	185
95	(750)	(690)	(600)	(433)	(334)	(237)	(171)
99		(540)	(482)	(354)	(290)	(209)	(153)
99,5		(481)	(440)	(332)	(268)	(200)	(148)

Tableau n° 3. 25.

HAUTEURS CARACTERISTIQUES DU SENEGAL A DIOULDE-DIABE  
(en cm)

F %	MAX	1 mois	2 mois	3 mois	4 mois	5 mois	6 mois
0,5		(1094)	(995)	(917)	(719)	(565)	(484)
1	(1137)	(1084)	(987)	(907)	(707)	(547)	(473)
5	1105	(1056)	(965)	(877)	(664)	(498)	(428)
10	1080	1039	(950)	(855)	(637)	472	(402)
25	1043	1003	914	810	589	432	366
50	992	953	858	739	530	396	326
75	934	892	780	(635)	(468)	365	290
90	(880)	(812)	(685)	(549)	(423)	(338)	264
95	(835)	(747)	(620)	(506)	(398)	(325)	(254)
99		(612)	(495)	(444)	(358)	(298)	(233)
99,5		(562)	(460)	(425)	(343)	(294)	(228)

Tableau n° 3. 26.

HAUTEURS CARACTERISTIQUES DU SENEGAL A SERPOLI

(en cm)

F %	MAX	1 mois	2 mois	3 mois	4 mois	5 mois
0,5		(903)	(806)	(724)	(570)	(381)
1	(921)	(892)	(798)	(713)	(554)	(362)
5	(895)	(862)	(775)	(678)	(494)	(309)
10	877	843	(760)	(653)	455	280
25	838	804	722	602	389	237
50	782	750	663	520	306	198
75	725	683	581	(400)	(235)	(165)
90	(662)	(596)	(482)	(302)	(186)	(136)
95	(600)	(525)	(413)	(253)	(158)	
99		(378)	(282)	(182)		
99,5		(324)	(245)	(160)		

Tableau n° 3. 27.

HAUTEURS CARACTERISTIQUES DU SENEGAL A ROSSO

(en cm)

F %	MAX	1 mois	2 mois	3 mois	4 mois
0,5	408	(384)	(330)	(269)	(190)
1	(400)	(376)	(322)	(261)	(186)
5	372	351	302	244	170
10	355	335	289	232	162
25	323	310	265	211	141
50	290	277	236	186	120
75	256	240	199	153	102
90	(223)	(203)	(166)	(124)	
95	(200)	(178)	(145)	(110)	
99	(155)	(131)	(110)		
99,5	(140)	(117)	(99)		

Tableau n° 3. 28.

HAUTEURS CARACTERISTIQUES DU DOUE A N'GOUI

(en cm)

F %	MAX	1 mois	2 mois	3 mois	4 mois	5 mois	6 mois
0,5		(1190)	(1123)	(1022)	(854)	(685)	(579)
1	(1246)	(1180)	(1113)	(1007)	(837)	(667)	(565)
5	(1211)	(1155)	(1085)	(965)	(790)	(622)	(524)
10	1185	1136	1066	940	760	595	506
25	1146	1105	1021	894	713	554	473
50	1092	1055	972	823	658	513	432
75	1031	999	904	742	597	476	395
90	974	924	835	665	549	444	372
95	(922)	(868)	(781)	(620)	(522)	(426)	(358)
99		(727)	(670)	(544)	(479)	(399)	(340)
99,5		(672)	(630)	(523)	(458)	(390)	(335)

Tableau n° 3. 29.

HAUTEURS CARACTERISTIQUES DU DOUE A MADINA

(en cm)

F %	LAX	1 mois	2 mois	3 mois	4 mois	5 mois	6 mois
0,5		(1064)	(1024)	(942)	(810)	(627)	(536)
1	(1098)	(1056)	(1015)	(927)	(793)	(609)	(522)
5	1070	1034	988	886	742	563	482
10	1048	1017	970	861	710	535	464
25	1017	990	928	816	659	493	432
50	971	948	881	746	599	451	392
75	924	901	816	665	533	414	356
90	(876)	(837)	(751)	(589)	(481)	(381)	(333)
95	(835)	(790)	(700)	(544)	(452)	(363)	(320)
99		(670)	(595)	(469)	(400)	(335)	(302)
99,5		(623)	(556)	(448)	(382)	(326)	(297)

Tableau n° 3.30.

HAUTEURS CARACTERISTIQUES DU DOUE A GUEDE

(en cm)

F %	MAX	1 mois	2 mois	3 mois	4 mois	5 mois
0,5	(791)	(765)	(723)	(665)	(558)	(445)
1	(785)	(759)	(716)	(657)	(550)	(427)
5	771	744	700	639	525	380
10	757	732	690	624	509	351
25	736	714	670	598	476	308
50	705	684	640	561	435	266
75	671	651	600	497	375	228
90	631	606	540	430	313	194
95	600	573	495	387	277	176
99	(520)	(490)	(419)	(339)	(241)	(147)
99,5		(455)	(392)	(329)	(224)	(138)

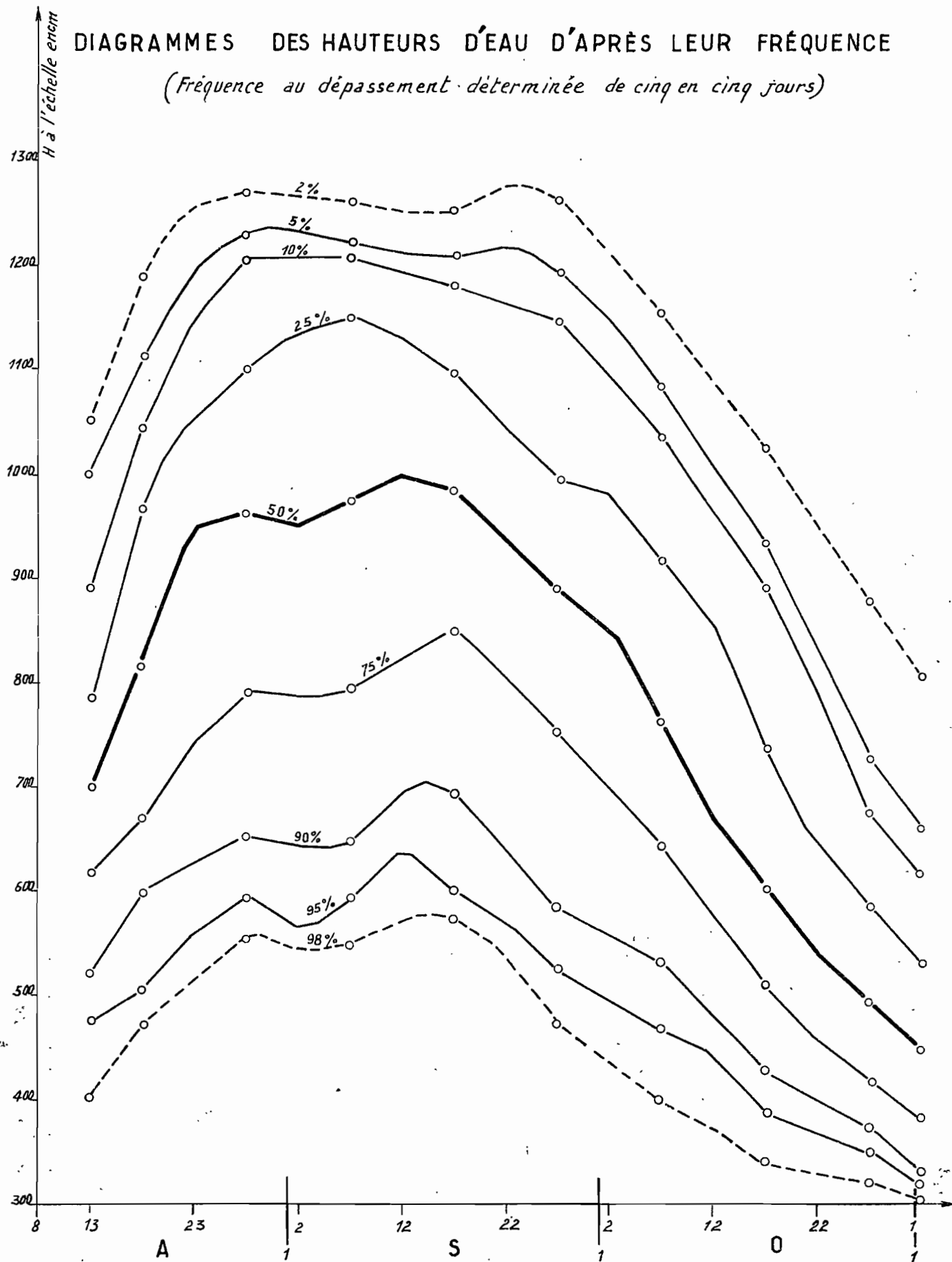


# BAKEL

Gc III 23

## DIAGRAMMES DES HAUTEURS D'EAU D'APRÈS LEUR FRÉQUENCE

(Fréquence au dépassement déterminée de cinq en cinq jours)



ORSTOM

AO  
DATE :

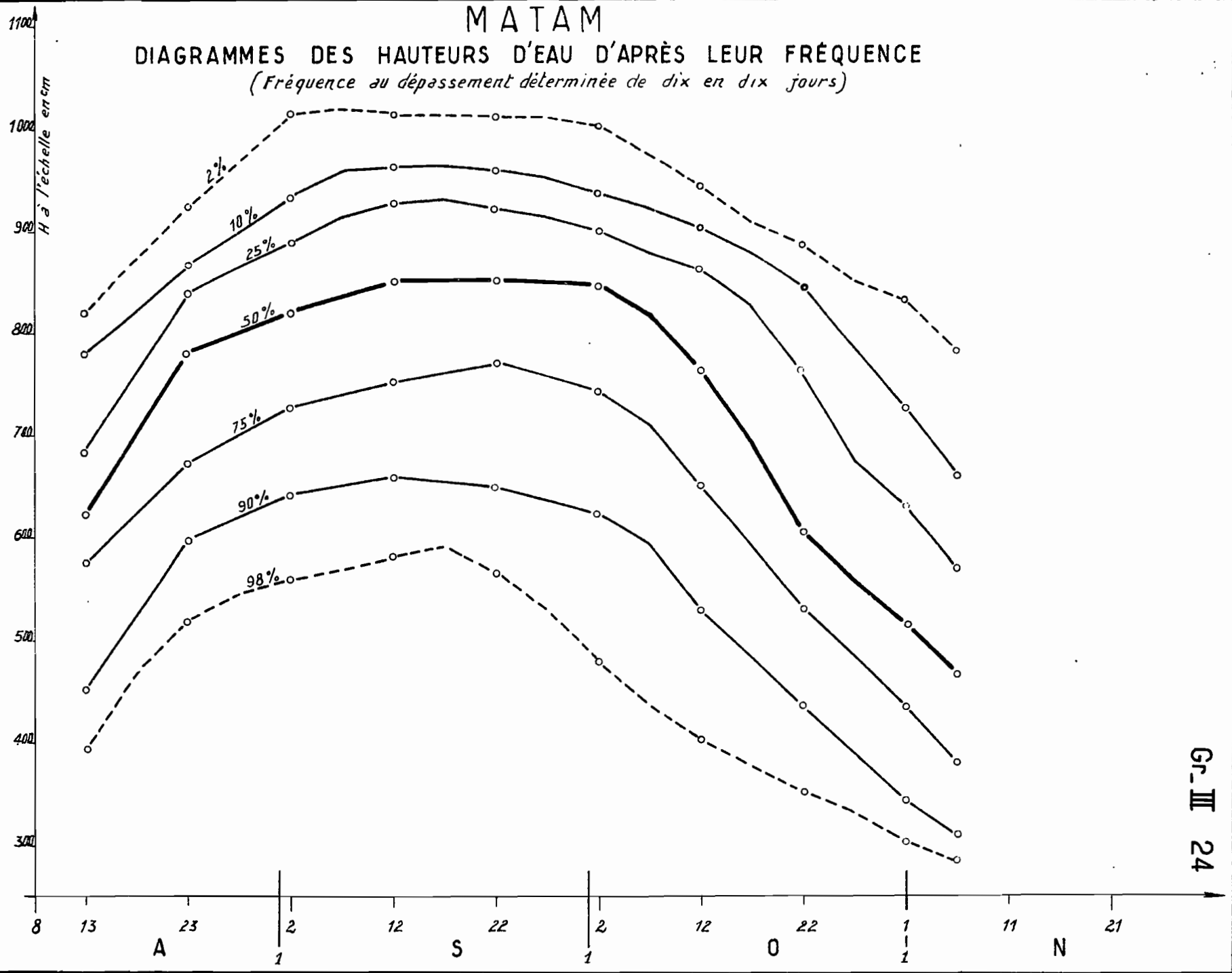
DESSINE :

SEN - 41.238

# MATAM

## DIAGRAMMES DES HAUTEURS D'EAU D'APRÈS LEUR FRÉQUENCE

(Fréquence au dépassement déterminée de dix en dix jours)

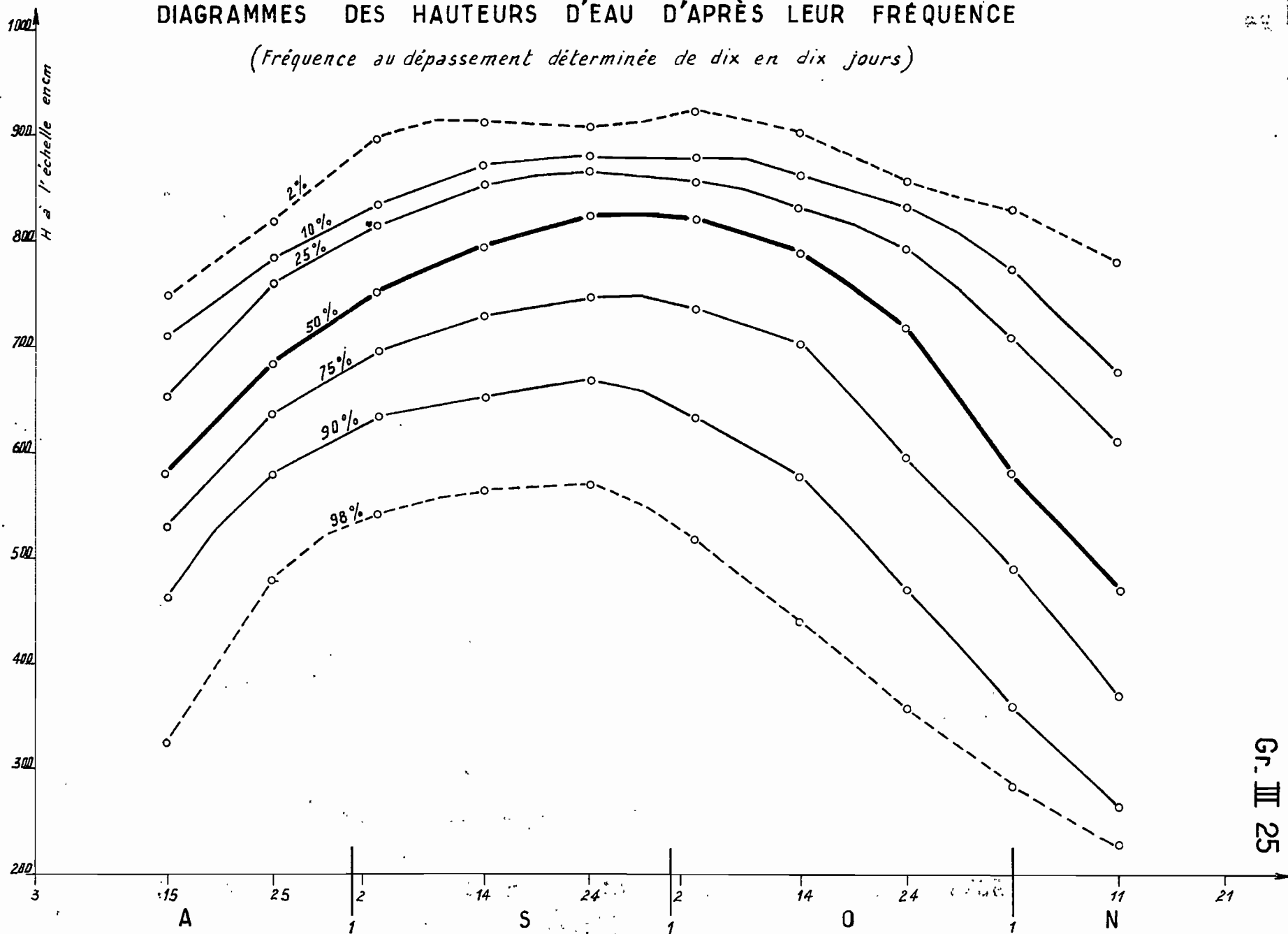


Gr. III 24

# KAEDI

## DIAGRAMMES DES HAUTEURS D'EAU D'APRÈS LEUR FRÉQUENCE

(Fréquence au dépassement déterminée de dix en dix jours)



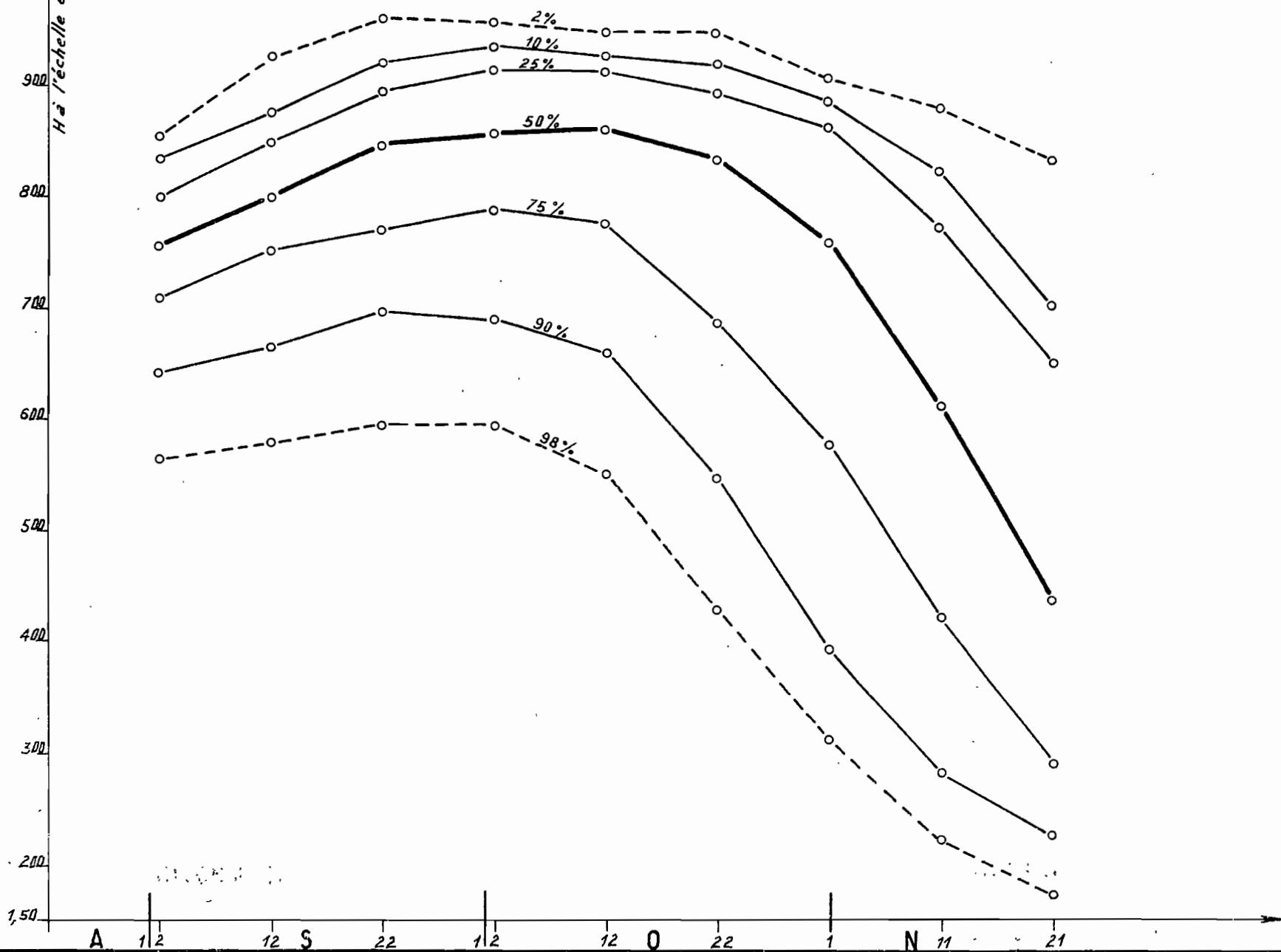
ORSTOM  
 A0  
 DATE :  
 DESSINÉ :  
 SEN - 41.239

Gr. III 25

# BOGHÉ

## DIAGRAMMES DES HAUTEURS D'EAU D'APRÈS LEUR FRÉQUENCE

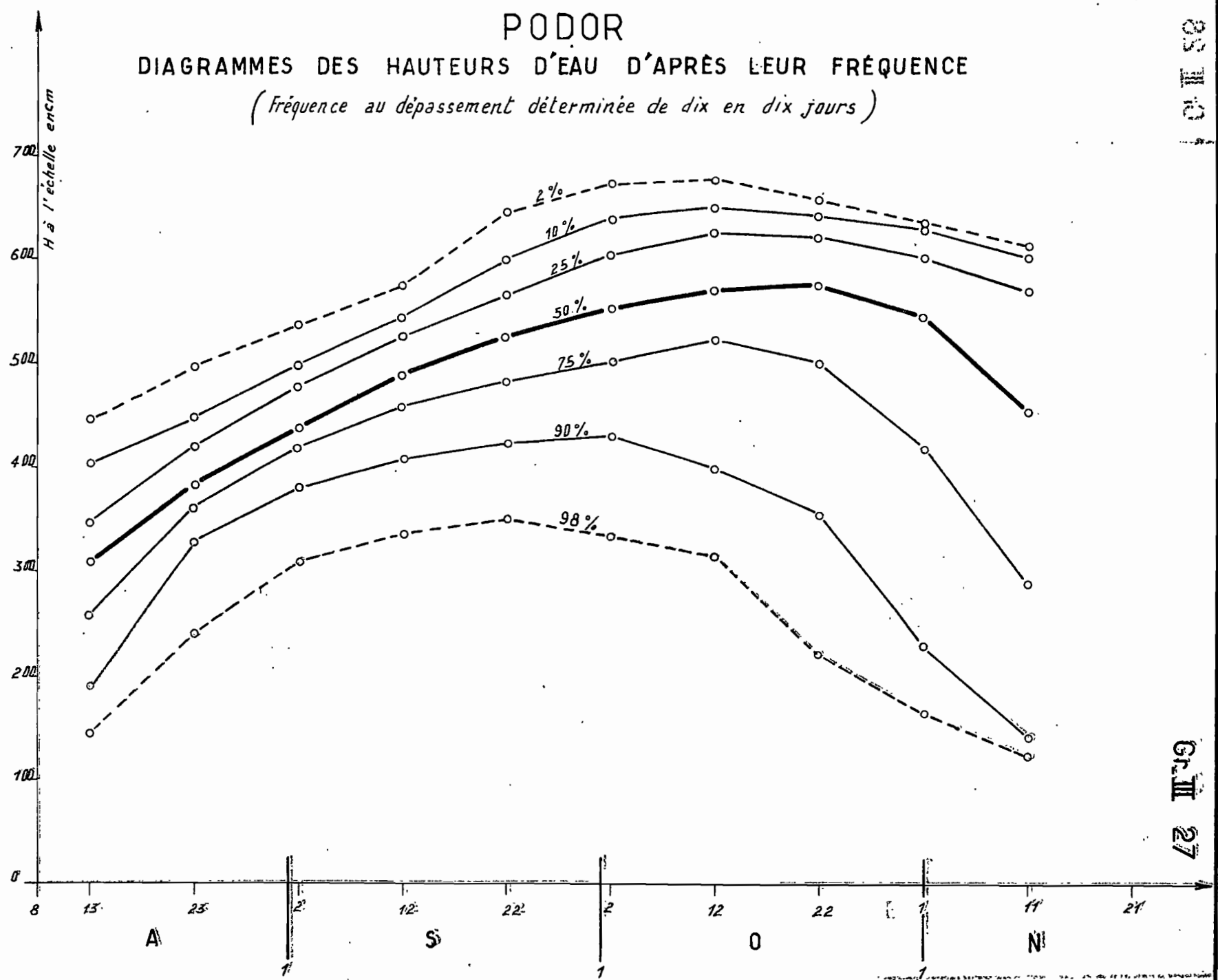
(Fréquence au dépassement déterminée de dix en dix jours)



# PODOR

## DIAGRAMMES DES HAUTEURS D'EAU D'APRÈS LEUR FRÉQUENCE

(Fréquence au dépassement déterminée de dix en dix jours)

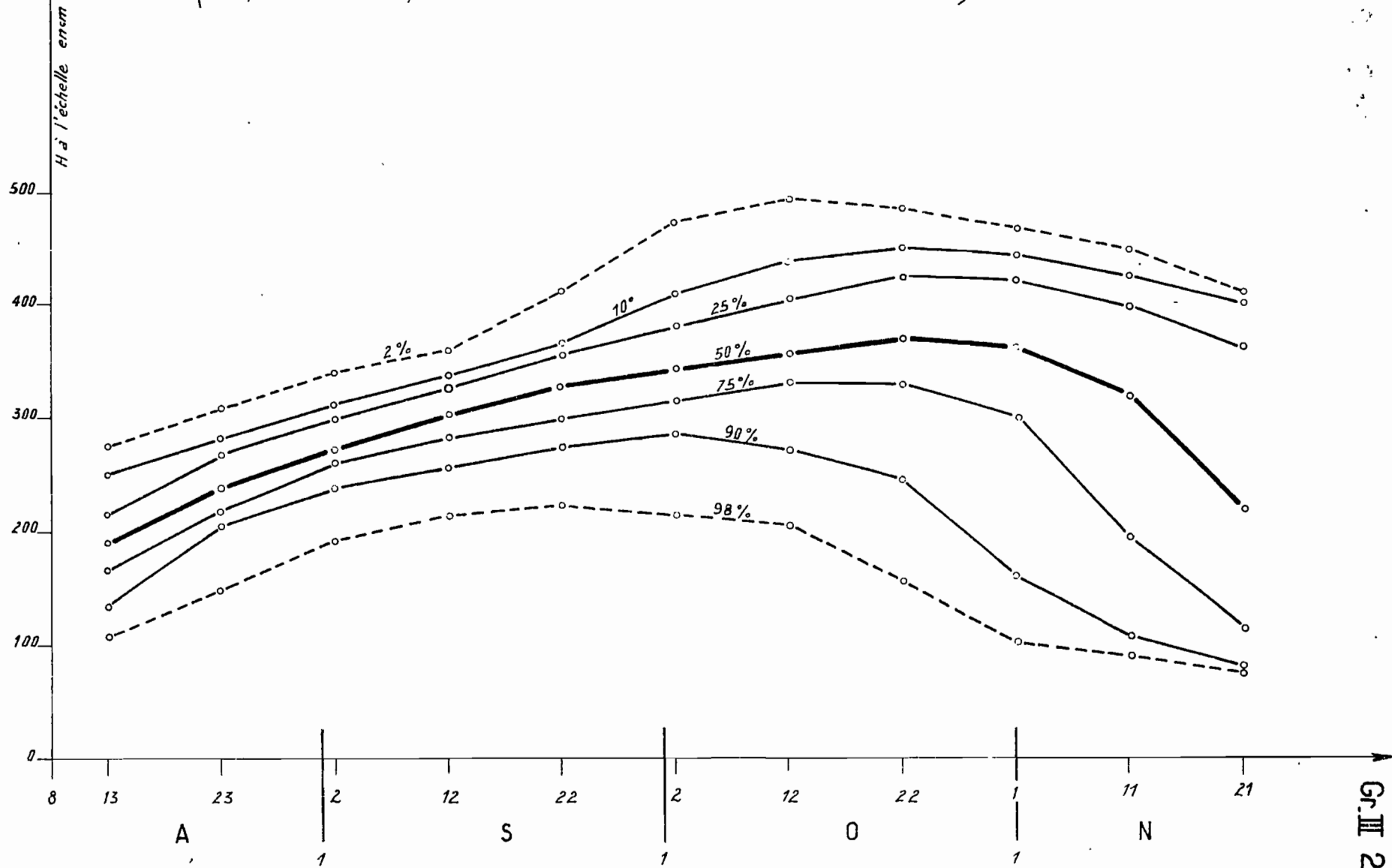


O R S T O M A O DATE DESSINE SEN - 41241

# DAGANA

## DIAGRAMMES DES HAUTEURS D'EAU D'APRÈS LEUR FRÉQUENCE

(Fréquence au dépassement déterminée de dix en dix jours)



ORSTOM

Ao

DATE :

DESSINÉ :

SEN 41242

Gr. III 28

et non au nombre d'années pour lesquelles la hauteur fixée est atteinte. On obtient ainsi la probabilité pour qu'une hauteur donnée soit atteinte avant telle ou telle date ou au cours d'une période déterminée.

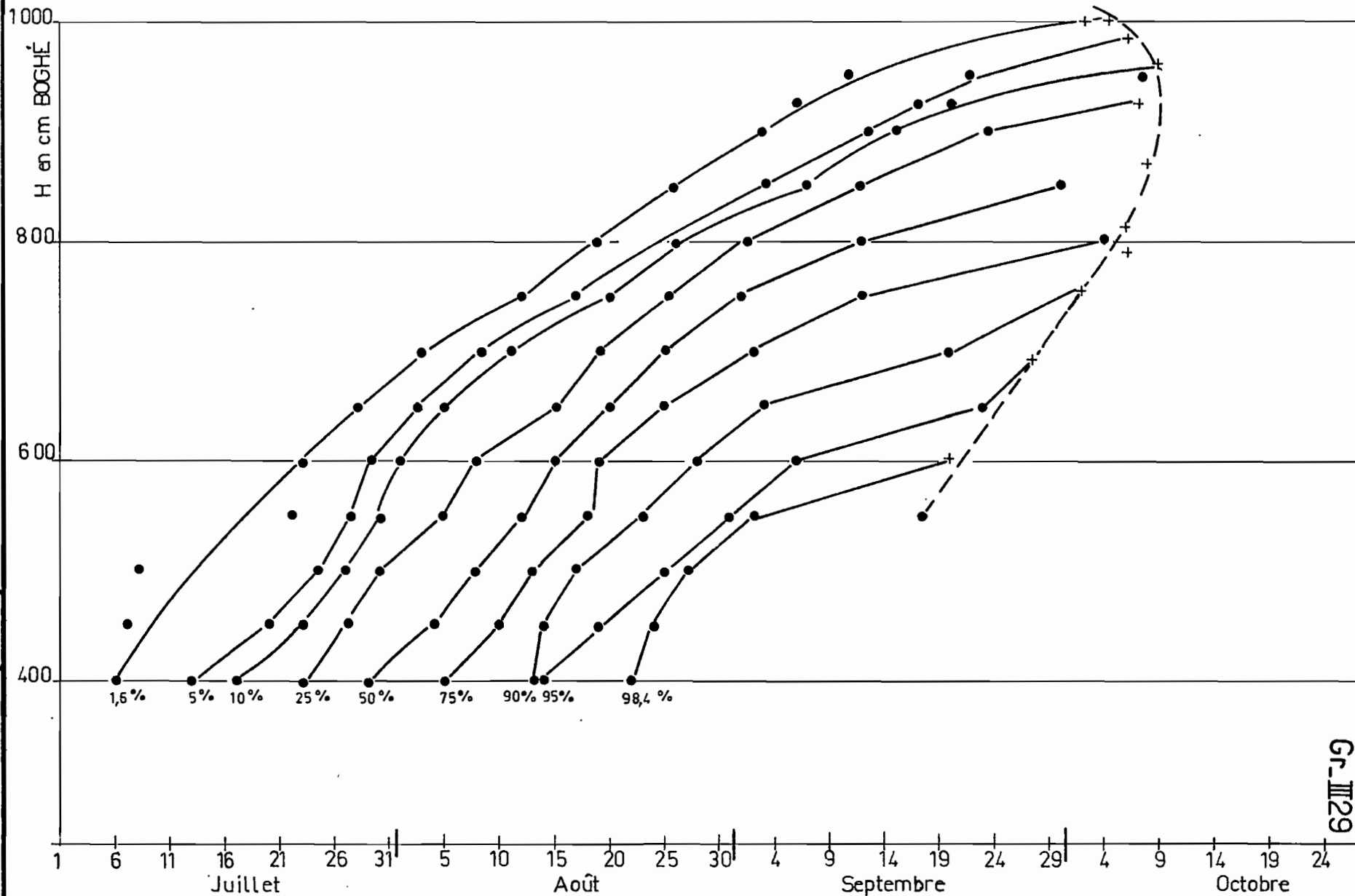
A titre d'exemple, nous avons fait cette étude pour le SENEGAL à BCGHE, à partir des relevés de la période 1903-1964. Les résultats sont donnés par le diagramme ci-joint (Gr n° III.29.).

Ce diagramme couvre une aire limitée vers la droite par une courbe (tracée en traits interrompus sur le graphique) qui indique la fréquence maximale relative aux diverses hauteurs considérées. On notera que cette fréquence est celle des maximums annuels.



# Le SÉNÉGAL à BOGHÉ

Probabilité liée à la date à laquelle une hauteur donnée est atteinte



## CHAPITRE II

### REGIME DES DEBITS

#### II - 1 - GENERALITES

Dans le Haut-Bassin, limité à la station de BAKEL (superficie 218 000 km<sup>2</sup>) on peut distinguer 3 régimes :

- régime tropical de transition (environ 15 % du bassin)
- régime tropical pur ( " 45 % " )
- régime sahélien ( " 40 % " )

Appartiennent au régime tropical de transition, les 2/3 environ du bassin du BAFING, les 2/5 de celui de la FALEME et l'extrémité supérieure de celui du BAKOYE, où les précipitations annuelles dépassent 1250 mm.

La saison de hautes eaux débute dès le mois de Juin et se prolonge jusqu'à la fin d'Octobre. Les étiages, quoique très marqués, sont sensiblement moins sévères que dans les régions situées plus au Nord.

Le régime tropical pur s'étend approximativement entre les isohyètes 1250 et 750 mm/an. Il couvre le bassin inférieur du BAFING, les 3/5 du bassin de la FALEME et la plus grande partie de ceux du BAKOYE et du BAULE (à l'exclusion de la Vallée du Serpent).

La saison de hautes eaux ne débute pas avant Juillet, culmine fin Août ou début Septembre et s'achève rapidement dans le courant d'Octobre. A la fin de la saison sèche, en Mai, il ne subsiste qu'un très faible débit d'étiage sur les grands cours d'eau ou les petits les plus favorisés.

Le régime sahélien règne au Nord de l'isohyète 750 mm/an, c'est-à-dire sur les régions drainés tant bien

que mal par la Vallée du Serpent, la KOLOMBINE et le KARA-KORO. A mesure que l'on s'éloigne vers le Nord, les écoulements deviennent de plus en plus épisodiques et les apports annuels de plus en plus insignifiants. Les réseaux hydrographiques se dégradent progressivement et deviennent plus ou moins nettement endoréiques, ce qui laisse mal définis les bassins réels d'alimentation.

Le régime de la Vallée reflète étroitement les conditions hydrologiques qui règnent dans le Haut Bassin puisque la quasi-totalité des apports du fleuve y prennent naissance. Il peut être qualifié de régime tropical assez pur, caractérisé dans ses grandes lignes par :

- une saison de hautes eaux de Juillet à Octobre,
- une saison de basses eaux, à décroissance très régulière, de Novembre à Mai-Juin.

Ce régime se conserve dans toute la Vallée, où le fleuve ne reçoit plus aucun apport si ce n'est un maigre affluent, le GORGOL. On note toutefois, de l'amont vers l'aval, un amortissement très sensible de la crue annuelle sous l'effet des débordements dans le lit majeur.

Pour préciser les indications qualitatives qui précèdent, nous allons examiner les caractéristiques hydrologiques essentielles que l'on peut dégager pour les différentes stations du Haut-Bassin et pour les 2 stations clefs de la Vallée : BAKEL et DAGANA.

## II.2. - Etude des modules

### II.2.1. Stations du SENEGAL moyen

De BAFLOULABE à KAYES, le SENEGAL ne reçoit que les apports assez négligeables de la KOLOMBINE. Par suite, ses caractéristiques hydrologiques seront sensiblement les mêmes au couple de stations GALOUGO-GOUINA et à KAYES.

Le SENEGAL à KAYES :

Cette dernière station (62 années d'observations mais 58 valeurs du module seulement) est celle qui permet le mieux d'établir ces caractéristiques.

Etant donné que les données aux stations principales de la Vallée sont complètes pour la période 1903-1964, nous avons commencé par compléter à 62 le nombre des valeurs du module à KAYES.

Les modules des années 1904, 1914 et 1919 ont été reconstitués par corrélation avec BAKEL après établissement de la régression des modules aux 2 stations :  $Y = 0,852X - 27$  (coefficient de corrélation : 0,89).

Pour le module de l'année 1924, on a utilisé la régression entre KAYES et GALOUGO :  $Y = 1,07X - 35,5$  ( $r = 0,99$ ).

Le report graphique (coordonnées gaussiennes) des 62 valeurs ainsi rassemblées, en fonction de leur fréquence au dépassement, permet d'ajuster très convenablement une droite à la distribution expérimentale. Celle-ci peut donc être assimilée à une distribution normale de Gauss dont la valeur moyenne s'établit à  $628 \text{ m}^3/\text{s}$  et l'écart type à  $184 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Le test du  $\chi^2$  donne un résultat satisfaisant : la probabilité pour qu'un échantillon issu d'une population normale présente un  $\chi^2$  supérieur à celui de la distribution étudiée est de 0,45.

L'intervalle de confiance à 95 % de la moyenne (probabilité 0,95 pour que la moyenne relative à une très longue période soit comprise dans cet intervalle) est borné par les valeurs 581 et  $675 \text{ m}^3/\text{s}$ . L'irrégularité interannuelle, définie par le rapport des modules décennaux humide et sec est de  $\frac{864}{392} = 2,2$ .

Ces résultats sont liés à la précision du tarage. Cette dernière sera estimée plus loin, lorsque nous comparerons entre eux les modules des différentes stations.

Le SENEGAL à GALOUGO ou GOUINA :

Rappelons que le tarage de GALOUGO est déduit de celui de GOUINA et qu'il est par suite sans intérêt de dis-

tinguer ces stations l'une de l'autre du point de vue des débits.

L'échantillon des modules à GALOUGO est 2 fois plus réduit qu'à KAYES.

Pour GALOUGO, comme pour les autres stations du Haut Bassin, nous ne bornerons pas notre étude à celle de l'échantillon des valeurs observées car il est possible, grâce aux corrélations liant les modules des différentes stations à ceux de KAYES, où l'échantillon est plus étendu, d'établir des données statistiques relatives à la période 1903-1964. On sait en outre que ces corrélations permettent, pour chaque station, d'estimer les paramètres de la distribution des modules avec une précision supérieure à celle résultant de la prise en compte des seules valeurs observées. Ce problème se pose fréquemment en hydrologie et sa résolution a conduit à l'établissement de formules permettant de calculer les paramètres précités et leurs intervalles de confiance. Rappelons que l'amélioration de l'estimation d'un paramètre se traduit par une réduction de son intervalle de confiance (lequel est inversement proportionnel à la racine carrée du nombre d'années d'observations). On voit donc qu'elle équivaut à la possession d'un certain nombre d'années d'observations supplémentaires, appelé gain et qui sert ainsi à la définir.

La corrélation des modules à KAYES et à GALOUGO, dont nous avons donné plus haut l'équation de régression, a été établie à partir des 29 années d'observations communes (période 1903-1924 et 1951-1964). Comme on pouvait s'y attendre, cette corrélation est très étroite (coefficient de corrélation 0,99).

En application de ce qui précède, les données statistiques concernant le module à GALOUGO s'établissent comme suit :

Période d'observations directes (29 années)	Module moyen	642 m <sup>3</sup> /s
	Ecart type	159 m <sup>3</sup> /s
Période 1903-1964	Module moyen	620 m <sup>3</sup> /s
	Ecart type	173 m <sup>3</sup> /s

Intervalle de confiance à 95 % de la moyenne : 575 - 665 m<sup>3</sup>/s  
Module décennal humide : 840 m<sup>3</sup>/s  
Module décennal sec : 400 m<sup>3</sup>/s  
Rapport des modules décennaux humide et sec : 2,10  
Gain : 31 années

La prise en compte des relevés de KAYES permet de déterminer la moyenne et l'écart type de la distribution du module à GALOUGO avec la même précision que si on possédait 60 années d'observations directes au lieu de 29, soit pratiquement avec la même précision qu'à KAYES.

#### II.2.2. Stations du BAKOYE

Aux stations hydrométriques du BAKOYE, comme aux autres stations du Haut Bassin (exception faite de KAYES, GALOUGO et KIDIRA), les relevés ne remontent pas au-delà de 1951.

Or la période 1951-64 a bénéficié d'une hydraulicité nettement supérieure à la moyenne comme le montre l'examen des modules de KAYES, BAKEL et DAGANA que l'on connaît depuis 1903.

A KAYES, la moyenne relative à la période 1951-64 (705,4 m<sup>3</sup>/s) présente, par rapport à la moyenne des 62 années (628 m<sup>3</sup>/s), un écart dont la probabilité au dépassement, en considérant la distribution des moyennes relatives à des échantillons de 14 ans (loi de STUDENT), est de 5,5 %.

Les données de la période 1951-64 conduisent donc à une estimation peu satisfaisante de la moyenne relative à une longue période et de son intervalle de confiance. Il convient donc de procéder pour ces stations comme nous l'avons fait pour GALOUGO.

#### Le BAKOYE à TOUKOTO :

On dispose à TOUKOTO de 8 valeurs du module, relatives à la période 1952-64 et dont la moyenne est de 105 m<sup>3</sup>/s. La corrélation des modules avec KAYES est assez bonne (coefficient de corrélation 0,80) et s'exprime par l'équation de ré-

gression  $Y = 0,154X - 8,5$ .

La prise en compte des relevés à KAYES pour les 54 années où le module à TOUKOTO n'a pas été observé, conduit aux estimations suivantes des paramètres de la distribution du module à cette station :

Moyenne (1903-64)	88,4 m <sup>3</sup> /s
Ecart type	32,6 m <sup>3</sup> /s
Intervalle de confiance à 95 % de la moyenne	70,5 - 106,5 m <sup>3</sup> /s
Module décennal humide	130 m <sup>3</sup> /s
Module décennal sec	47 m <sup>3</sup> /s
Rapport des modules décennaux humide et sec	2,79
Gain	7 années

Le rapport des modules décennaux humide et sec, qui est relativement élevé, caractérise une assez forte irrégularité interannuelle.

Le BAKOYE à OUALIA (ou KALE) :

Le module moyen pour les 12 années d'observations est de 184,7 m<sup>3</sup>/s et l'écart type de 52 m<sup>3</sup>/s.

La corrélation des modules de OUALIA (Y) et de KAYES (X) s'exprime par l'équation :

$$Y = 0,3035X - 32 \quad (r = 0,80)$$

Le calcul des paramètres de la distribution du module pour la période 1903-64 conduit aux valeurs ci-après dont la précision est la même que si on disposait de 23 années d'observations au lieu de 12.

Moyenne	159 m <sup>3</sup> /s
Ecart type	64,2 m <sup>3</sup> /s
Intervalle de confiance à 95 % de la moyenne	131 - 187 m <sup>3</sup> /s
Gain	11 années
Module décennal humide	241 m <sup>3</sup> /s
Module décennal sec	77 m <sup>3</sup> /s
Rapport des modules décennaux humide et sec	3,13

### II.2.3. Stations du BAFING

#### Le SENEGAL à DAKKA-SAIDOU :

Pour la période d'observations (12 années), le module moyen est de 313 m<sup>3</sup>/s et l'écart type de 50 m<sup>3</sup>/s.

La corrélation des modules avec KAYES est très étroite (coefficient de corrélation 0,96) et s'exprime par l'équation de régression  $Y = 0,335X + 77$ .

Par suite, les estimations données ci-dessous, de la moyenne et de l'écart type de la distribution des modules, sont faites avec une précision très supérieure à celle que donne l'échantillon des modules observés.

Module moyen (1903-64)	288 m <sup>3</sup> /s
Ecart type (1903-64)	63,1 m <sup>3</sup> /s
Intervalle de confiance à 95 % de la moyenne	269 - 307 m <sup>3</sup> /s
Gain	33 années
Module décennal humide	369 m <sup>3</sup> /s
Module décennal sec	207 m <sup>3</sup> /s
Rapport des modules décennaux humide et sec	1,78

Ce rapport est le plus faible enregistré sur le Haut Bassin, ce qui est normal étant donné que le bassin du BAFING, limité à la station de DAKKA-SAIDOU, est le seul parmi les bassins étudiés à appartenir en totalité au régime tropical de transition.

#### Le BAFING à DIBIA (ou DEGUERRE) :

Le module moyen relatif aux 10 années de relevés est de 466 m<sup>3</sup>/s et l'écart type de 83 m<sup>3</sup>/s.

La corrélation des modules avec KAYES s'exprime par l'équation de régression  $Y = 0,607X + 52$  (coefficient de corrélation 0,93).

On ne doit pas attribuer de signification parti-

culière au fait que ce coefficient soit un peu inférieur à celui de la corrélation DAKKA-SAIDOU, KAYES, étant donné qu'il ne s'agit pas de valeurs exactes mais d'estimations. On notera d'ailleurs qu'adopter un coefficient DAKKA-SAIDOU KAYES égal ou même un peu inférieur à 0,93, ne modifierait pas sensiblement les résultats obtenus précédemment pour DAKKA-SAIDOU.

Le calcul des paramètres de la distribution des modules, compte tenu des valeurs observées à KAYES, conduit aux estimations suivantes :

Module moyen (1903-64)	433 m <sup>3</sup> /s
Ecart type (1903-64)	115,8 m <sup>3</sup> /s
Intervalle de confiance à 95 % de la moyenne	396 - 470 m <sup>3</sup> /s
Gain	29 années
Module décennal humide	581 m <sup>3</sup> /s
Module décennal sec	285 m <sup>3</sup> /s
Rapport des modules décennaux humide et sec	2,04

#### II.2.4. Stations de la FALEME

##### La FALEME à FADOUGOU :

Plusieurs recoupements ont montré que les modules des années 1952, 1953 et 1954 étaient aberrants (20 % trop forts) et nous les avons éliminés, ce qui réduit à 8 le nombre des valeurs observées (module moyen 126,5 m<sup>3</sup>/s, écart type 22,8 m<sup>3</sup>/s).

La corrélation des modules avec KAYES est moins étroite que les précédentes (coefficient de corrélation 0,76). Elle s'exprime par l'équation de régression  $Y = 0,122X + 38$ .

On aboutit aux estimations suivantes :

Module moyen (1903-64)	114,7 m <sup>3</sup> /s
Ecart type	27 m <sup>3</sup> /s
Intervalle de confiance à 95 % de la moyenne	99 - 130 m <sup>3</sup> /s
Gain	6 années

Module décennal humide	149 m <sup>3</sup> /s
Module décennal sec	80 m <sup>3</sup> /s
Rapport des modules décennaux humide et sec	1,86

La FALEME à GOURBASSI :

L'échantillon des modules observés (11 années) a une moyenne de 183,2 m<sup>3</sup>/s et un écart type de 29,6 m<sup>3</sup>/s.

La corrélation des modules avec KAYES est plus étroite qu'à FADOUGOU et s'exprime par l'équation de régression  $Y = 0,186X + 46,7$  (coefficient de corrélation = 0,84).

Le calcul conduit aux estimations suivantes :

Module moyen (1903-64)	164 m <sup>3</sup> /s
Ecart type	37,7 m <sup>3</sup> /s
Intervalle de confiance à 95 % de la moyenne	149 - 179 m <sup>3</sup> /s.
Gain	14 années
Module décennal humide	212 m <sup>3</sup> /s
Module décennal sec	116 m <sup>3</sup> /s
Rapport des modules décennaux humide et sec	1,84

La FALEME à KIDIRA :

A KIDIRA, l'échantillon des modules observés comprend 29 valeurs dont 15 correspondent à la période 1930-1946.

Rappelons que les relevés de cette dernière période ont été revalorisés. L'opération a consisté à faire varier le calage de l'échelle jusqu'à obtenir une régression des modules avec KAYES coïncidant avec la régression 1951-64. Elle n'a pas eu pour effet de réduire la dispersion naturelle des modules antérieurs à 1950, ce qui permet d'utiliser l'ensemble des 29 valeurs pour l'étude statistique.

L'échantillon formé par ces 29 valeurs a une moyenne de 200 m<sup>3</sup>/s et un écart type de 64,5 m<sup>3</sup>/s.

Pour la période 1951-64, le module moyen est de

220,8 m<sup>3</sup>/s (écart type 45 m<sup>3</sup>/s).

L'équation de régression des modules avec KAYES s'écrit :  $Y = 0,318X - 5$  (coefficient de corrélation 0,90).

On aboutit pour la période 1903-54 aux estimations suivantes :

Module moyen	195 m <sup>3</sup> /s
Ecart type	64,8 m <sup>3</sup> /s
Intervalle de confiance à 95 % de la moyenne	177 - 213 m <sup>3</sup> /s
Gain	22 années
Module décennal humide	278 m <sup>3</sup> /s
Module décennal sec	112 m <sup>3</sup> /s
Rapport des modules décennaux humide et sec	2,5

#### II.2.5. Stations de la Vallée

##### Le SENEGAL à BAKEL :

L'exploitation des relevés à BAKEL a conduit à la détermination complète des modules annuels depuis 1903.

Le test du  $\chi^2$  appliqué à la distribution des 62 valeurs du module, montre que l'hypothèse d'une distribution normale de Gauss est très vraisemblable (probabilité au dépassement du  $\chi^2$  obtenu : 0,6).

La valeur moyenne de la distribution estimée à partir de cet échantillon est de 770 m<sup>3</sup>/s et son écart type de 242 m<sup>3</sup>/s. Cette moyenne est assortie d'un intervalle de confiance à 95 % défini par les valeurs 708 et 831 m<sup>3</sup>/s. L'irrégularité interannuelle définie par le rapport des modules décennaux humide et sec est de  $1080 / 460 = 2,35$ . Cette valeur concorde assez bien avec celles obtenues à KAYES et à KEMERA. Eu égard à la superficie du bassin versant, l'irrégularité interannuelle est assez forte par rapport à celle du NIGER (1,9 à KOULIKORO).

##### Le SENEGAL à DAGANA :

Comme pour KAYES et BAKEL, la distribution des mo-

dules de la période 1903-64 peut être assimilée à une distribution normale qui fait l'objet des estimations suivantes :

Valeur moyenne	690 m <sup>3</sup> /s
Ecart type	157 m <sup>3</sup> /s
Intervalle de confiance à 95 % de la moyenne	650 - 730 m <sup>3</sup> /s
Module décennal humide	890 m <sup>3</sup> /s
Module décennal sec	490 m <sup>3</sup> /s
Rapport des modules décennaux humide et sec	1,8

L'irrégularité interannuelle s'atténue sensiblement entre BAKEL et DAGANA, ce qui peut s'expliquer par un certain effet régulateur des zones d'inondation où les pertes par évapotranspiration augmentent avec l'amplitude de la crue.

#### II.2.6. Comparaison des modules aux stations principales du Haut-Bassin

La détermination des modules annuels et les estimations précédentes des modules moyens sont soumises à l'imprécision du tarage des différentes stations.

Or la disposition du réseau du Haut Bassin limité à BAKEL implique, entre les modules des stations principales, l'existence des 2 égalités suivantes ; Module DIBIA + module OUALIA = module GALOUGO. Module KAYLS + module KILIRA = module BAKEL.

En effet, on peut considérer, en ce qui concerne la 1<sup>ère</sup> égalité, que les apports du bassin intermédiaire, sont négligeables et en ce qui concerne la seconde, que ces apports sont compensés par les pertes dans les zones d'inondation entre AROUNDOU et BAKEL.

Le contrôle de ces égalités par les modules moyens de la période sûre 1951-64, aux six stations intéressées, permet de faire des hypothèses sur la valeur de leur tarage et éventuellement de dégager la tendance de tel étalonnage à surestimer ou à sous-estimer les débits.

Les modules annuels qui n'ont pas été observés à

OUALIA et à DIBIA de 1951 à 1964 ont été reconstitués à l'aide des régressions linéaires établies précédemment et ont abouti pour les six stations aux modules moyens suivants :

Stations	Module moyen (période 1951-1964)	Totaux partiels
OUALIA	181	
DIBIA	484	665
		(OUALIA + DIBIA)
GALOUGO	698	
KAYES	705	
KIDIRA	221	926
		(KAYES + KIDIRA)
BAKEL	865	

On constate :

1°) Que le module à GALOUGO est de 5 % supérieur à la somme des modules du BAFING et du BAKOYE.

2°) Que la somme des modules de KAYES et de KIDIRA est de 7 % supérieure au module à BAKEL.

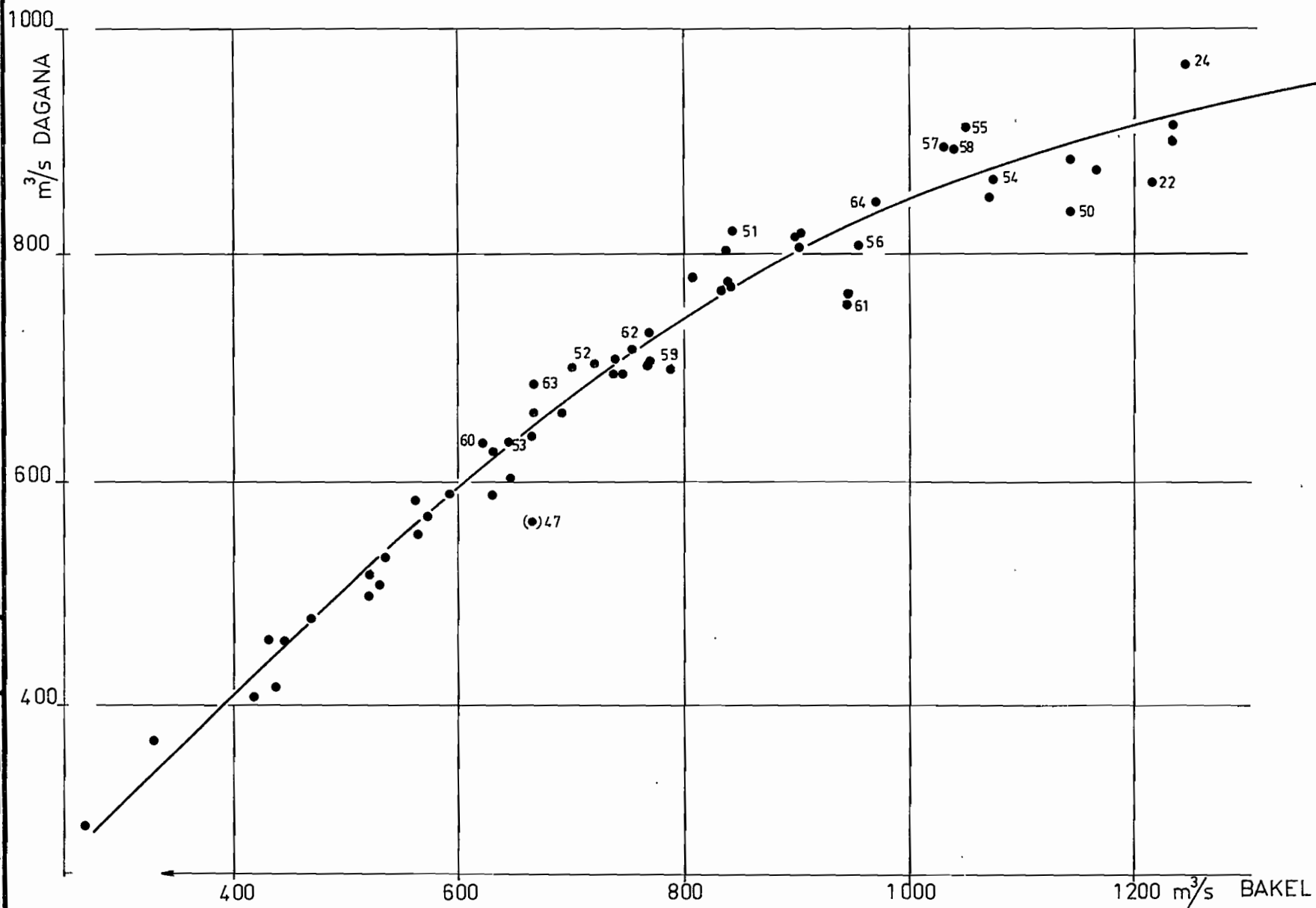
Ces écarts ne peuvent que correspondre à des défauts d'étalonnage étant donné que les apports entre les stations dont on cumule les débits et la station aval correspondante sont négligeables.

A l'échelle annuelle, on constate que les écarts sont toujours du même signe et sont compris entre 1,7 et 12,4 % du module à DIBIA + OUALIA pour le 1<sup>er</sup> groupe de stations et compris entre 3,6 et 10,8 % du module à BAKEL pour le 2<sup>ème</sup> groupe.

Ces écarts sont significatifs et montrent que les tarages de KAYES et de GALOUGO, tous deux déduits de GOUINA, ont de fortes chances d'être surestimés.

C'est l'hypothèse la plus vraisemblable, étant donné que la somme des modules du BAFING, du BAKOYE et de la FALME (total 886 m<sup>3</sup>/s) diffère assez peu du module à BAKEL (écart 2,4%).

# Correlation entre les modules à BAKEL et à DAGANA



Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer

8.5.67  
J/R

SEN. 41.244

### II.2.7. Comparaison des modules à BAKEL et à DAGANA.

Le graphique de corrélation des modules annuels des 2 stations (C. III.30) montre que le module à DAGANA est inférieur ou tout au plus égal à celui de BAKEL, ce dernier cas correspondant aux années de faible hydraulicité. La différence, imputable aux pertes par évapotranspiration dans les zones d'inondation, croît avec l'hydraulicité à BAKEL. Elle est de 6 % en année d'hydraulicité moyenne et de 18 % en année décennale humide. Elle atteindrait 30 % en année de très forte hydraulicité (module centenaire humide).

La corrélation est relativement étroite en année faible ou moyenne. La dispersion des points est plus importante en année de forte hydraulicité.

### II.3. - Etude des débits maximaux annuels

Alors que l'étude statistique des modules a pu être faite pour la totalité des stations hydrométriques, celle des maximums annuels ne peut s'envisager que pour les stations observées pendant plusieurs dizaines d'années. Dans le Haut-Bassin, seules les stations de GALOUGO, KAYES et KIDIRA remplissent cette condition. Dans la Vallée, l'étude concernera les stations de BAKEL, MATAM et DAGANA.

Les données que nous allons établir, pour les 3 stations du Haut Bassin et pour BAKEL, devront être considérées comme provisoires car il est prudent d'admettre que l'imprécision du tarage de ces stations, mise en évidence dans le paragraphe précédent, affecte plus particulièrement les forts débits et rend la détermination des maximums encore moins précise que celle des modules. Cette remarque s'applique surtout à KAYES et à GALOUGO où les erreurs de tarage sont, semble-t-il, les plus importantes.

Pour les stations du Haut-Bassin, autres que celles précitées, l'étude de la distribution des maximums, à partir d'un échantillon dont la taille ne dépasse pas 12 années, conduirait à des résultats par trop imprécis et il n'est pas possible de réduire cette imprécision comme on l'a fait pour les modules, car les corrélations des maximums des diverses stations avec KAYES, sont trop lâches.

### II.3.1. Le SENEGAL à GALOUGO (ou GOUINA)

A GALOUGO, l'échantillon est constitué par 31 valeurs allant de 920 à 6 880 m<sup>3</sup>/s. Le report graphique (coordonnées gaussiennes) des maximums annuels en fonction de leur fréquence au dépassement, permet d'ajuster une droite à la loi de distribution expérimentale (Gr n° III.31.). On peut donc assimiler la distribution des maximums à une distribution normale de Gauss dont les caractéristiques sont les suivantes :

Moyenne	3 970 m <sup>3</sup> /s
Ecart type	1 133 m <sup>3</sup> /s
Intervalle de confiance à 90 % de la moyenne	3 970 ± 336 m <sup>3</sup> /s

Les valeurs remarquables atteintes par ces maximums, et les intervalles de confiance correspondants (à 90 %) s'établissent comme suit :

Maximum décennal	5 420 ± 455 m <sup>3</sup> /s
Maximum centenaire	6 600 ± 650 m <sup>3</sup> /s

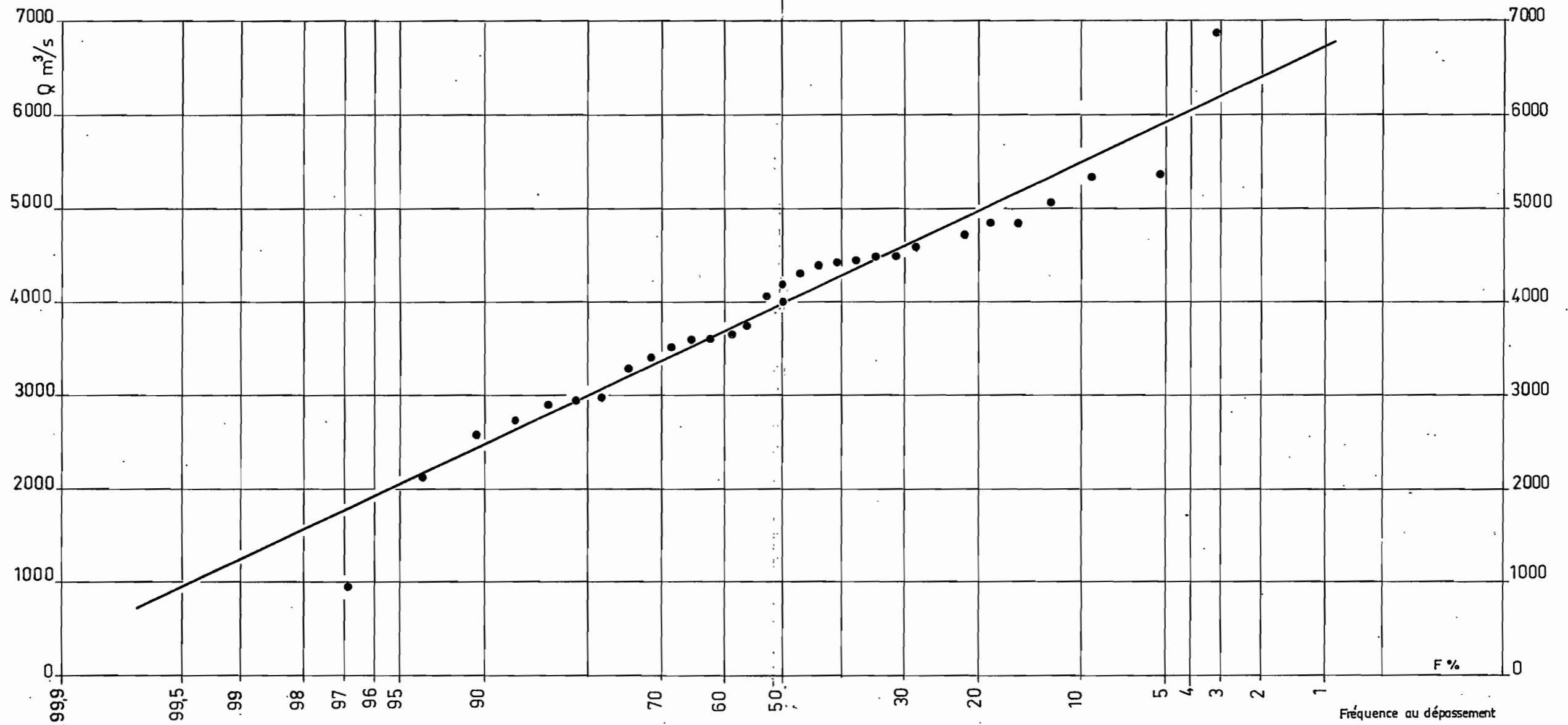
(Pour le calcul des intervalles de confiance, on admet que l'erreur type sur un percentile  $Q = \bar{Q} + u\sigma$  est égale à  $\frac{\sigma}{\sqrt{2-N}} \sqrt{u^2 + 2}$ )

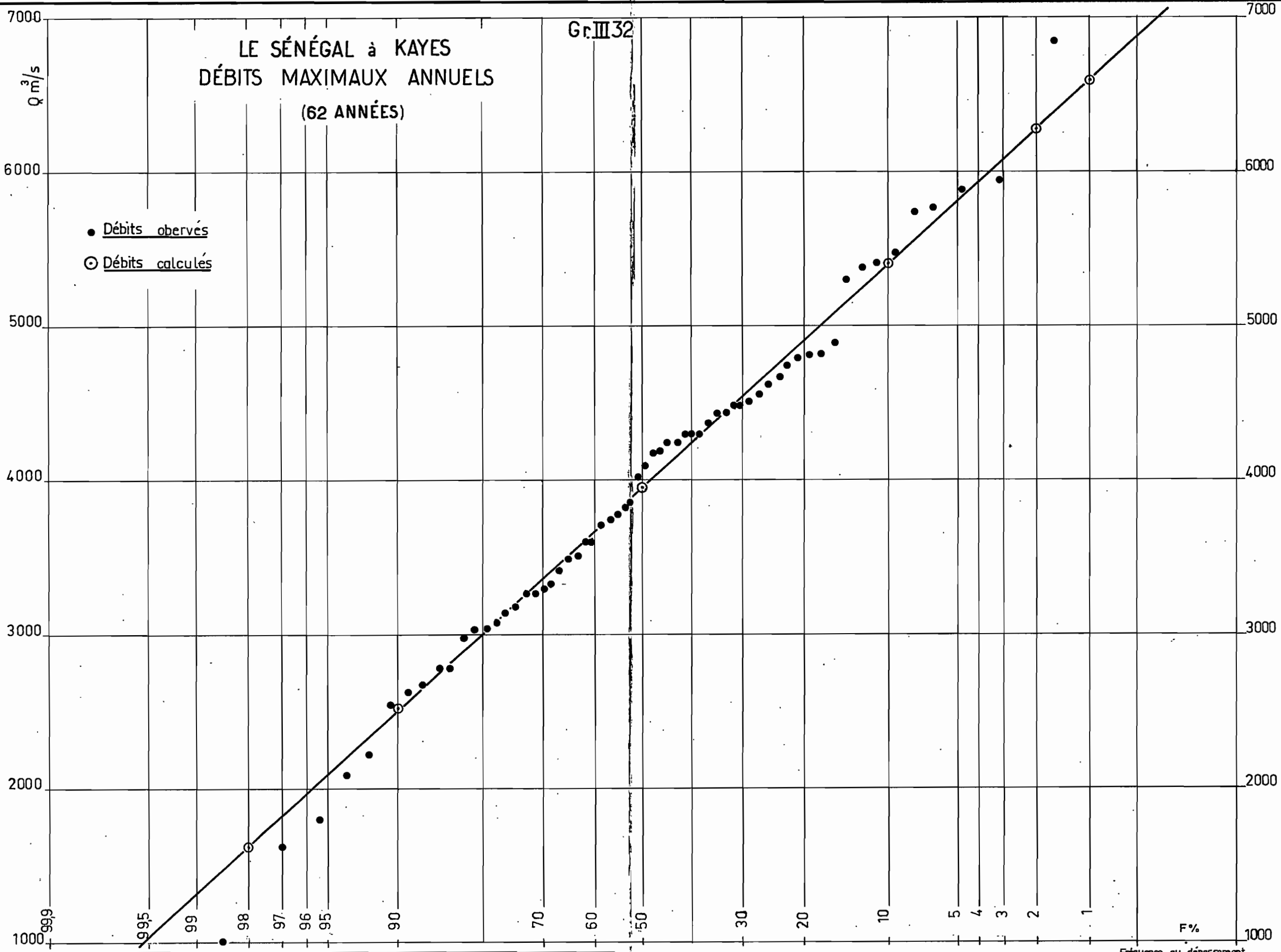
### II.3.2. Le SENEGAL à KAYES

La valeur du  $\chi^2$  fournie par l'échantillon des 62 valeurs observées ( $\chi^2$  à 80%), permet, de façon plus nette encore qu'à GALOUGO, d'assimiler la distribution des maximums à une distribution normale de Gauss dont la droite d'ajustement est présentée par le graphique n° III.32.

Les caractéristiques de cette distribution (moyenne 3 940 m<sup>3</sup>/s, écart type 1 137 m<sup>3</sup>/s), sont très voisines de celles établies pour GALOUGO mais présentent l'avantage d'une détermination plus précise étant donné que la période d'observation est plus importante :

LE SÉNÉGAL à GALOUGO  
 DISTRIBUTION DES DÉBITS MAXIMAUX ANNUELS  
 (31 ANNÉES)





L'intervalle de confiance à 90 % de la moyenne s'établit à  $3\ 940 \pm 240\ m^3/s$ .

Les valeurs décennale et centenaire, avec mention de leur intervalle de confiance à 90 %, sont respectivement :

Maximum décennal	$5\ 395 \pm 320\ m^3/s$
Maximum centenaire	$6\ 575 \pm 460\ m^3/s$

### II.3.3. La FALEME à KIDIRA

Les débits maximaux et caractéristiques (période 1930-1945) du tableau n° 2.26. (2<sup>ème</sup> partie-tome 1) ont été relevés par erreur sur des fiches de débits journaliers inadéquates. En effet, plusieurs traductions des hauteurs anciennes en débits ont été effectuées en considérant divers calages du zéro de l'échelle afin de déterminer le calage réel, c'est-à-dire celui conduisant à une corrélation des modules avec KAYES identique à la corrélation 1951-1964. Les débits portés dans le tableau n° 2.26. ne correspondent pas au calage que la méthode a permis de définir (zéro à 21.40 M.E.F.S. de 1930 à 1932 et zéro à 20.71 M.E.F.S. de 1933 à 1946) mais à la première hypothèse faite (zéro à 21.70 M.E.F.S.). Les débits incriminés sont remplacés par ceux du tableau ci-après.

Comme pour les stations précédentes, on peut considérer que l'échantillon des maximums observés (30 au total) est issu d'une population normale (Gr N° III.33.) dont les caractéristiques sont les suivantes :

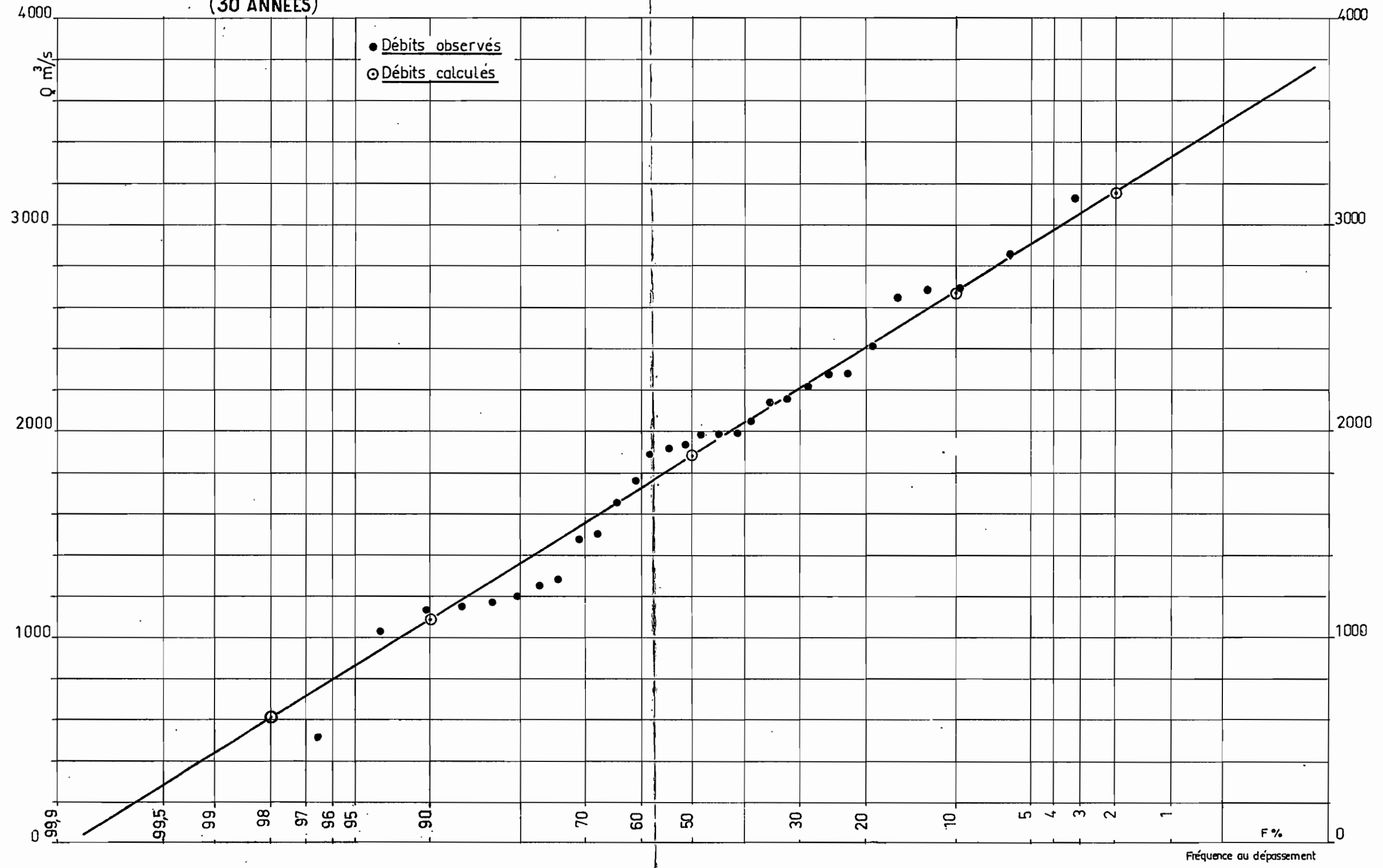
Moyenne et intervalle de confiance à 90 %	$1\ 880 \pm 190\ m^3/s$
Ecart type	$619\ m^3/s$
Maximum décennal et intervalle de confiance à 90 %	$2\ 670 \pm 250\ m^3/s$
Maximum centenaire et intervalle de confiance à 90 %.	$3\ 315 \pm 360\ m^3/s$

Correctif du tableau n° 2.26.

Année	Etiage: absolu	Débits caractéristiques (m <sup>3</sup> /s)					Crue	
		DCE	DC9	DC6	DC3	DCC	Maximum	Date
1930-31				(20)	138	1345	1760	27-8
1931-32				(24)	250	1175	1650	15-9
1932-33							1500	26-8
1933-34				(35)	230	1510	2214	24-8
1934-35				(20)	95	1570	2268	28-8
1935-36				(20)	262	1862	2160	25-8
1936-37				(41)	260	1766	2268	20-9
1937-38					172	1070	1470	15-9
1938-39				(45)	238	1280	2056	15-9
1939-40					124	870	1026	23-8
1940-41					90	646	1179	23-8
1941-42					60	801	1147	28-8
1942-43					40	893	1280	21-8
1944-45					(100)	435	516	21-9
1946-47					180	1316	1910	30-8

DÉBITS MAXIMAUX ANNUELS

(30 ANNÉES)



#### II.3.4. Le SENEGAL à BAKEL

A BAKEL, la distribution des maximums ne peut pas être assimilée à une distribution normale de Gauss, ce en quoi elle se distingue des distributions observées aux stations précédentes. On est en présence d'une distribution dissymétrique caractérisée par un étalement des débits supérieurs au débit médian plus grand que celui des débits inférieurs à ce débit médian. Parmi les lois susceptibles d'être utilisées, c'est la loi de Galton (Gibrat-Gauss) qui conduit aux meilleurs résultats d'ajustement à la distribution expérimentale. Rappelons que, dans cette loi, la variable qui est normalement distribuée est  $y = \log (Q + Q_0)$  dont la valeur réduite (variable de Gauss) :  $u = \frac{y_i - \bar{y}}{\sigma_y}$  est par suite une fonction

linéaire du logarithme de  $Q + Q_0$  :

$$u = a \log (Q + Q_0) - b$$

(a, b et  $Q_0$  étant les paramètres d'ajustement de la loi).

La valeur de  $Q_0$  est déterminée graphiquement. C'est celle qui, en coordonnées gaussio-logarithmiques, permet d'aligner les points représentatifs des débits  $Q + Q_0$  (portés en ordonnée logarithmique tandis que les fréquences figurent en abscisses). Voir graphique n° III.34. La détermination des paramètres a et b revient à celle des paramètres de la distribution normale des y. On aboutit pour les maximums à BAKEL à l'expression suivante :

$$u = 10,225 \log_{10} (Q + 3\ 000) - 39,69.$$

La probabilité au dépassement du  $\chi^2$  de l'échantillon (0,25) témoigne de la validité de l'ajustement.

L'application de cette loi de Galton permet de calculer les valeurs théoriques des débits maximaux de diverses fréquences. On relève parmi ces valeurs :

le débit de crue médian	4 600 m <sup>3</sup> /s
le débit de crue décennal	7 140 m <sup>3</sup> /s
le débit de crue centenaire	9 825 m <sup>3</sup> /s

Les écarts entre ces valeurs théoriques et les données brutes de l'échantillon sont faibles (inférieurs à 6 %)

et montrent que l'ajustement est valable aussi bien pour les valeurs faibles que pour les valeurs élevées.

La moyenne, estimée à partir de l'échantillon, est de 4 795 m<sup>3</sup>/s.

Pour déterminer l'intervalle de confiance d'un percentile  $Q_i$ , on calcule celui du percentile correspondant  $y_i$  dont l'erreur type est donnée par la formule :

$$\text{erreur } \sigma \text{ sur } y_i = \frac{\sigma y}{\sqrt{2N}} \sqrt{u^2 + 2} \quad \text{avec } N = 62 \text{ années.}$$

Pour la moyenne ( $u = 0,1096$ ), le calcul de l'intervalle de confiance à 90 % s'effectue comme suit :

$$\begin{aligned} \text{IC à 90 \% de } \log (\bar{Q} + Q_0) &= \log (\bar{Q} + Q_0) \pm \frac{1,65 \sigma y}{\sqrt{2N}} \sqrt{u^2 + 2} \\ &= 3,89182 \pm 0,0206 \end{aligned}$$

D'où l'intervalle de confiance à 90 % de  $\bar{Q}$  :

$$4\ 420 < \bar{Q} < 5\ 170 \text{ m}^3/\text{s}$$

On détermine de même l'intervalle de confiance à 90 % de la crue décennale ( $u = 1,28$ ) :

$$\begin{aligned} \text{IC à 90 \% de } \log (Q_{\text{décennal}} + Q_0) &= \log (Q_{\text{décennal}} + Q_0) \\ &\pm \frac{1,65 \sigma y}{\sqrt{2N}} \sqrt{u^2 + 2} \\ &= 4,00628 \pm 0,0277 \end{aligned}$$

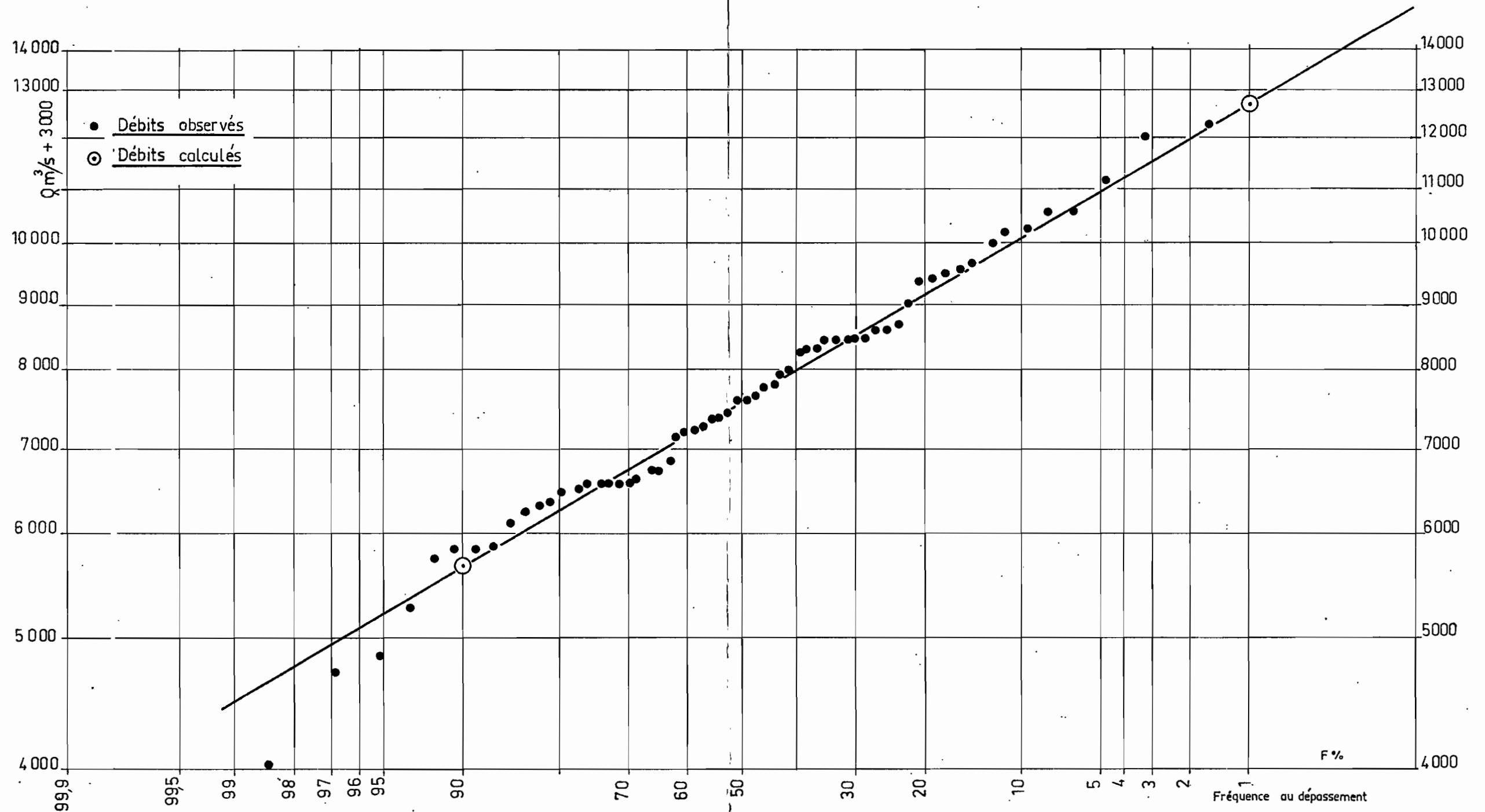
$$\text{d'où : } 6\ 500 < Q_{\text{décennal}} < 7\ 820 \text{ m}^3/\text{s}$$

Un calcul analogue donne l'intervalle de confiance à 90 % de la crue centenaire.

$$8\ 700 < Q_{\text{centenaire}} < 11\ 020 \text{ m}^3/\text{s}$$

L'existence d'une loi de distribution des maximums symétrique à KAYES et à KIDERA et dissymétrique à BAKEL est peu vraisemblable et nous paraît provenir essentiellement des imperfections déjà signalées du tarage des 3 stations. En effet, il n'est guère possible d'attribuer cette évolution de la distribution des maximums de l'amont vers l'aval à l'action du KARAKORO dont les crues sont vraisemblablement peu importantes.

LE SÉNÉGAL à BAKEL  
 DÉBITS MAXIMAUX ANNUELS  
 (62 ANNÉES)



On pourrait éventuellement l'expliquer par une comitance des maximums à KAYES et à KIDIRA meilleurs pour les fortes crues que pour les crues faibles. Cette hypothèse ne peut être retenue. On constate en effet, que l'intervalle de temps séparant les maximums annuels de KAYES et de KIDIRA n'est pas lié de façon significative à l'amplitude de la crue à BAKEL.

Il y a donc de fortes chances pour que la loi de distribution des maximums soit la même à KAYES et à BAKEL, mais on ne peut se prononcer sur la forme exacte de cette loi. En principe, les cours d'eau dont une partie du bassin appartient au régime sahélien et qui ne comportent pas de zones de débordement, présentent des maximums distribués suivant une loi dissymétrique. On peut par suite admettre que les résultats obtenus pour BAKEL sont valables et que pour le SENEGAL à KAYES, l'imperfection du tarage conduit à une loi de distribution des maximums un peu différente de la loi réelle. Etant donné la tendance constatée du tarage de cette station à surestimer les débits, l'hypothèse d'une loi dissymétrique implique que cette surestimation porte uniquement sur les débits de moyennes eaux.

### II.3.5. Le SENEGAL à MATAM

Comme pour BAKEL, la loi de distribution des maximums est dissymétrique (GR III.35.) et on constate la validité de l'ajustement d'une loi de Galton à la distribution expérimentale (la probabilité de dépassement du  $\chi^2$  de l'échantillon est de 0,20).

Cette loi est définie par l'expression :

$$u = 7,82 \log (Q + 1 050) - 28,9$$

On aboutit aux valeurs remarquables suivantes :

Débit maximal médian	3 930 m <sup>3</sup> /s
Débit maximal décennal	6 210 m <sup>3</sup> /s
Débit maximal centenaire	8 810 m <sup>3</sup> /s

La moyenne estimée à partir de l'échantillon est de 4 125 m<sup>3</sup>/s.

Les intervalles de confiance à 90 % s'établissent comme suit :

Crue moyenne	3 810 - 4 460 m <sup>3</sup> /s
Crue décennale	5 625 - 6 830 m <sup>3</sup> /s
Crue centenaire	7 710 - 10 050 m <sup>3</sup> /s

Comparés aux valeurs correspondantes trouvées à BAKEL, ces résultats rendent compte de l'amortissement notable que subissent les maximums entre les 2 stations du fait des débordements.

On observe les réductions suivantes du débit de pointe :

15 % pour la crue moyenne
13 % pour la crue décennale
10 % pour la crue centenaire

### II.3.6. Le SENEGAL à DAGANA

L'étude statistique des maximums (GR III.36) montre qu'on peut les considérer comme distribués suivant une loi normale caractérisée par une moyenne de 2 492 m<sup>3</sup>/s et un écart type de 532 m<sup>3</sup>/s (probabilité au dépassement du  $\chi^2$  : 0,80). L'intervalle de confiance à 90 % de la moyenne s'établit à 2 492  $\pm$  112 m<sup>3</sup>/s.

On obtient pour les maximums décennal et centenaire et leurs intervalles de confiance à 90 % respectifs, les valeurs suivantes :

Maximum décennal	3 175 $\pm$ 150 m <sup>3</sup> /s
Maximum centenaire	3 725 $\pm$ 215 m <sup>3</sup> /s

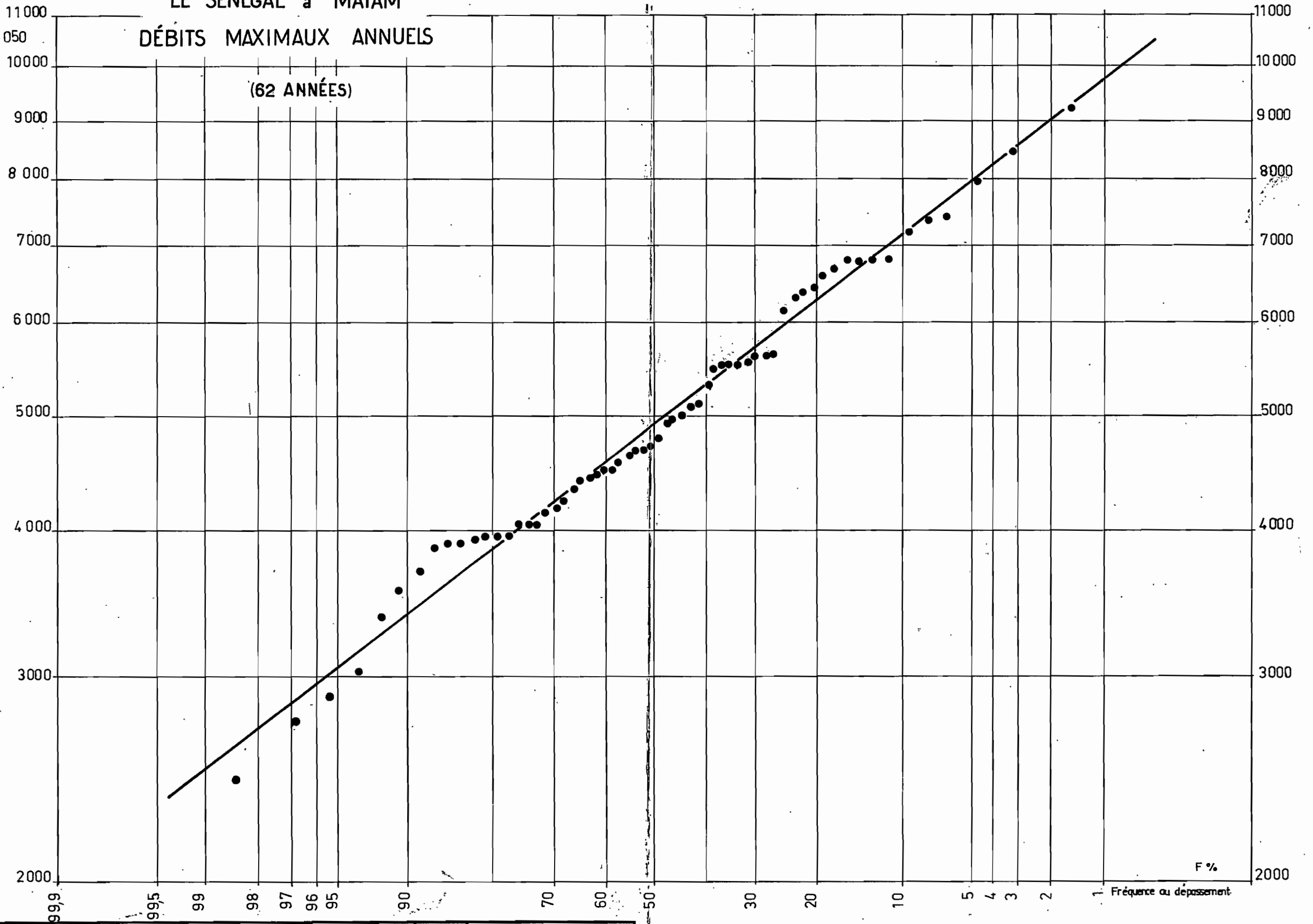
Les débits maximaux moyen décennal et centenaire ne représentent respectivement que 52, 45 et 38 % des débits maximaux correspondants à BAKEL.

Ces chiffres montrent que l'amortissement des crues dans la vallée est considérable et augmente avec l'importance de la crue comme l'implique, pour la distribution des maximums, le passage, d'une loi dissymétrique à une loi normale entre BAKEL et DAGANA.

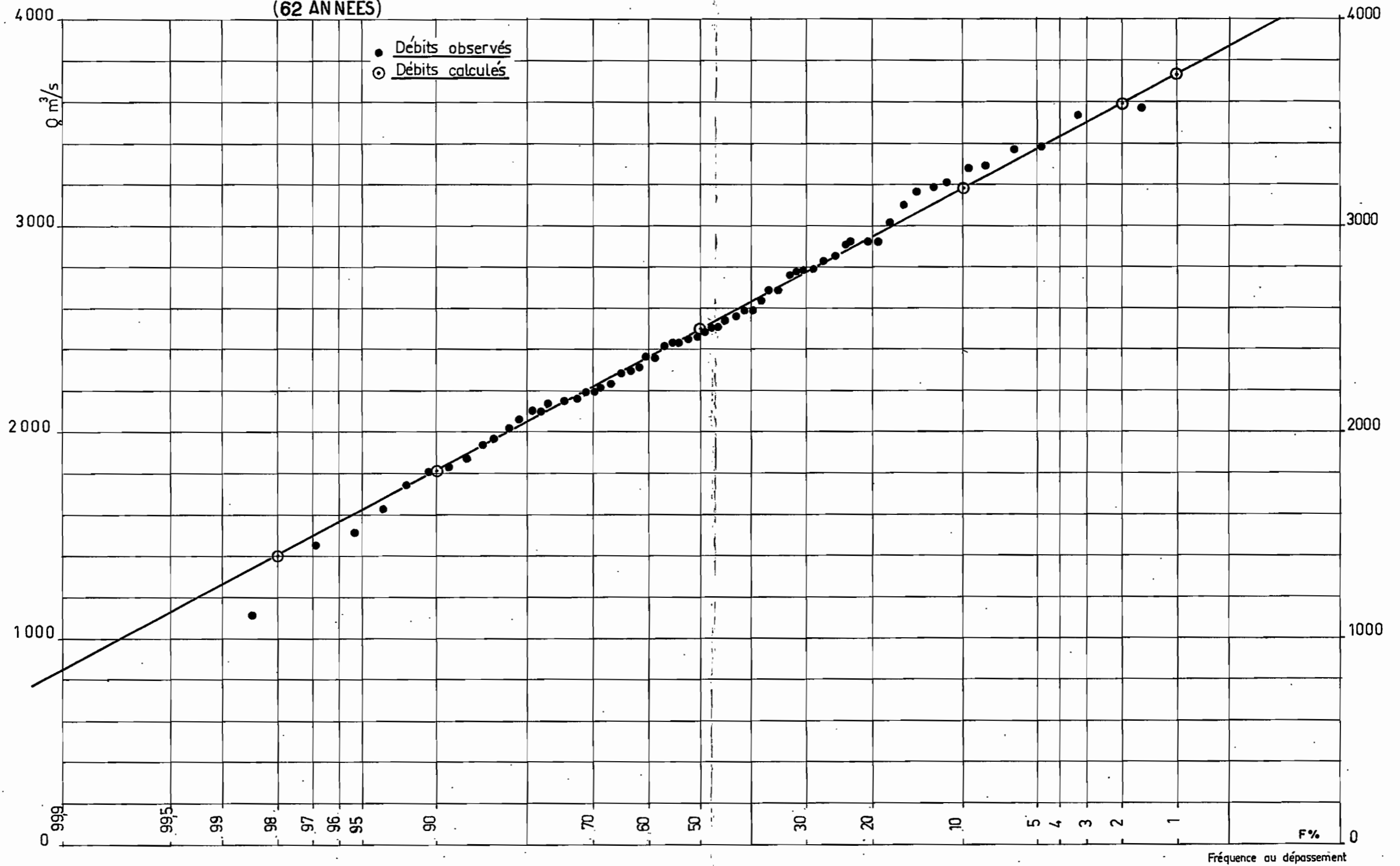
LE SÉNÉGAL à MATAM  
DÉBITS MAXIMAUX ANNUELS

(62 ANNÉES)

$Q \text{ m}^3/\text{s} + 1050$



DÉBITS MAXIMAUX ANNUELS  
(62 ANNÉES)



#### II.4. - Volumes stockés dans le lit majeur

Le lit majeur joue un rôle déterminant dans la propagation des crues. Son action se traduit par un étalement de l'hydrogramme annuel et par une diminution importante du débit de pointe de l'amont vers l'aval. Cet effet régulateur est très marqué et peut être comparé à celui qu'exercerait un lac. Pour le caractériser, nous avons déterminé, pour différentes crues, le volume maximal stocké dans le lit majeur, entre BAKEL et DAGANA. Le processus est le suivant : on détermine d'abord l'évolution dans le temps du volume stocké dans la Vallée entre les 2 stations en faisant les différences cumulées de leurs débits journaliers respectifs, puis on retranche de ce volume celui stocké dans le lit mineur. L'évaluation de ce dernier est faite à l'aide de la formule ci-dessous :

$$S = K [xq_1 + (1 - x) q_2] = K q$$

qu'on utilise en première approximation en se limitant aux périodes pour lesquelles l'écoulement est localisé au lit mineur. S est le volume stocké exprimé en m<sup>3</sup>/s.jour (unité égale à 86 400 m<sup>3</sup>),

q<sub>1</sub> le débit journalier à BAKEL,

q<sub>2</sub> le débit journalier à DAGANA à la même date,

q une moyenne pondérée de q<sub>1</sub> et q<sub>2</sub>,

K une constante caractéristique du bief considéré.

x la valeur du coefficient de pondération à adopter dans cette formule est celle qui conduit aux mêmes variations de S à la crue et à la décrue, c'est-à-dire à une relation S (q) univoque. On l'obtient par tâtonnements en faisant plusieurs essais sur quelques crues et en se limitant, bien entendu, aux périodes pour lesquelles l'écoulement est localisé au lit mineur.

Cette expression du volume stocké est à la base d'une méthode de calcul de la propagation des débits entre 2 stations limitant un bief sans lit majeur, connue sous le nom de méthode de MUSKINGUM.

Pour le bief BAKEL-DAGANA, on trouve  $x = 0,2$  et  $K = 15$ .

La valeur de  $K$  s'obtient graphiquement [pente de la droite  $S(q)$ ]. Nous présentons un des graphiques établis à cet effet : Gr. n° III-37 relatif à l'année 1960.

L'expression obtenue  $S = 15 (0,2 q_1 + 0,8 q_2)$ , relative au stockage dans le lit mineur serait encore valable lorsqu'il y a débordement, si le débit pondéré  $0,2 q_1 + 0,8 q_2$  correspondait au débit moyen (moyenne spatiale) dans le lit mineur entre BAKEL et DAGANA. En réalité il lui est supérieur puisque représentatif du débit total dans la vallée. En conséquence, l'application de la formule précédente conduit à surestimer le stockage dans le lit mineur lorsqu'il y a débordement. Nous n'avons pas cherché une détermination plus rigoureuse du stockage dans le lit mineur en pareil cas. Nous avons conservé la formule précédente dans les calculs et considéré que les résultats obtenus sont entachés d'une erreur par excès en ce qui concerne les volumes stockés dans le lit mineur, et d'une erreur par défaut en ce qui concerne les volumes stockés dans le lit majeur. En fait, les résultats, en ce qui concerne le lit majeur, sont très valables et correspondent assez bien au stockage réel, étant donné qu'on n'a pas tenu compte, dans les calculs, des pertes par infiltration et évapotranspiration consécutives à la mise en eau du lit majeur.

Un exemple d'évolution comparée du stockage dans le lit mineur et dans le lit majeur est donné par le graphique n° III-38 relatif à la crue 1964. On constate que le début d'alimentation du lit majeur correspond à un débit pondéré assez faible (2 000 m<sup>3</sup>/s environ) et que le débit moyen de débordement entre BAKEL et DAGANA, pendant la période de remplissage, est de l'ordre de 2 500 - 3 000 m<sup>3</sup>/s en année de forte crue.

Le volume finalement retenu dans le lit majeur à la décrue et le rapport entre ce volume et le stockage maximal constituent deux données complémentaires intéressantes à considérer dans cette étude.

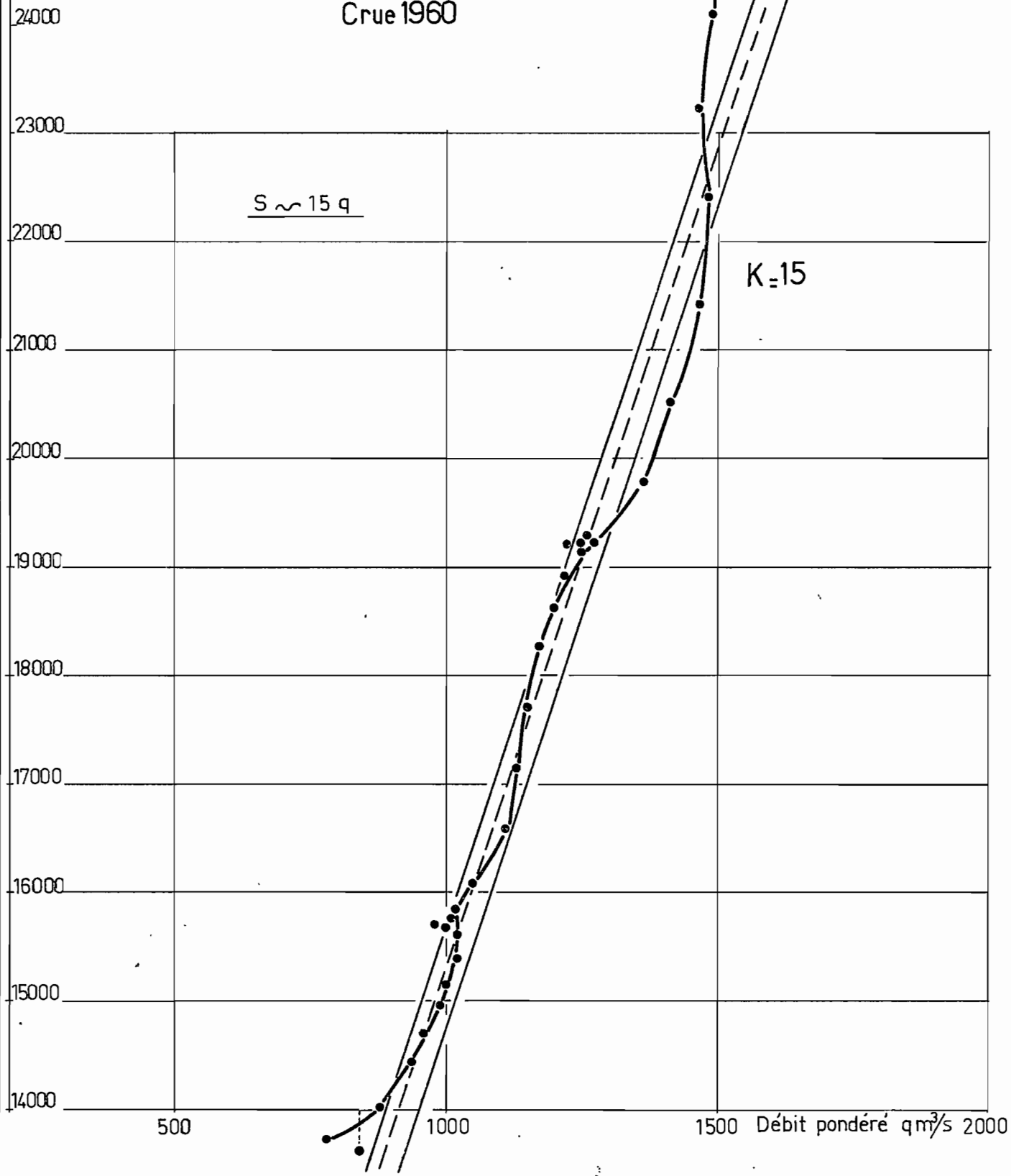
Le tableau n° 3-31 rassemble les valeurs de ces diverses caractéristiques relatives au stockage pour 6 crues d'importance variable.

S m<sup>3</sup>/s . jours

Gr. III.37

# Variation du stockage dans le lit mineur entre BAKEL et DAGANA

Crue 1960



ÉVOLUTION DU STOCKAGE DANS LES LITS MAJEUR ET MINEUR  
ENTRE BAKEL ET DAGANA  
Crue 1964

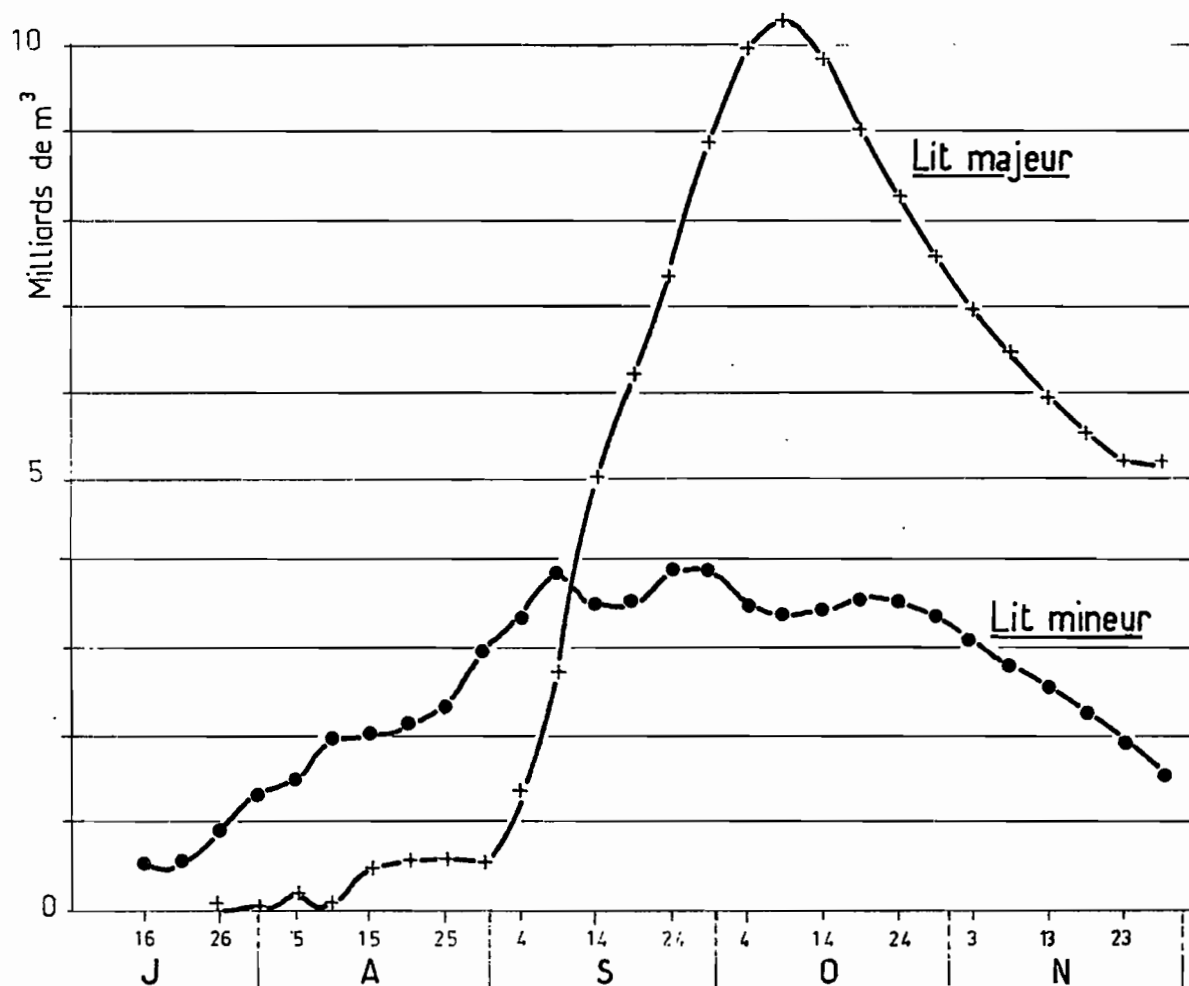


Tableau n° 3-31

STOCKAGE entre BAKEL et DAGANA (MILLIARDS de M<sup>3</sup>)

Années	Stockage maximal		Volume final retenu dans le lit majeur	Rapport entre volume retenu et Stockage max. dans le lit majeur	Volume annuel écoulé à BAKEL	Hauteur moyenne max. de 40 jours à BAKEL (cm)
	lit mineur	lit majeur				
1958	3,8	9,1	5,2	0,57	32,8	1 095
1960	2,8	1,7	(0,1)	(0,06)	19,7	823
1961	4,0	9,8	6	0,61	29,8	1 084
1962	3,1	5,0	1,5	0,30	24,3	980
1963	2,9	2,1	(0,2)	(0,10)	21,0	840
1964	3,9	10,2	5,2	0,51	30,6	1 127

N.B. Les valeurs dont la détermination est très imprécise figurent entre parenthèses.



sur les tarissements des années anciennes. Depuis 1950, les relevés limnimétriques couvrent, à quelques exceptions près, la totalité du cycle hydrologique annuel et concernent un nombre plus important de stations notamment dans le Haut bassin. On dispose par suite d'une masse d'informations qui, bien que variable suivant les stations, permet de définir avec une précision satisfaisante les caractéristiques de vidange des différents bassins.

Nous donnons à titre d'exemple, sur le graphique n° III.39, les décroissances des débits en coordonnées logarithmiques observées en 1956-57 aux stations de OUALIA, DIBIA, KIDIRA, GALOUGO et BAKEL.

Comme le confirme l'étude des autres stations, la vidange des bassins obéit à une loi exponentielle de la forme :

$$Q_t = Q_0 e^{-kt}$$

dans laquelle :

$Q_0$  est le débit au jour J,

$Q_t$  le débit au jour J + t,

t le nombre de jours entre les débits  $Q_0$  et  $Q_t$ ,

k la constante de tarissement.

Pour certaines stations du Haut bassin (OUALIA, KIDIRA) et pour celles du SENEGAL de GALOUGO à DIOULDE-DIABE, la loi de décroissance est formée de 2 exponentielles successives. A la première loi, qui correspond au tarissement, succède une autre loi exponentielle caractérisée par un coefficient de décroissance  $k'$  supérieur à k. Cette 2ème loi de décroissance est appelée "épuisement". Son existence s'explique par l'importance que prennent les pertes par évaporation dans le lit du cours d'eau par rapport au débit qui y transite, lorsque ce dernier atteint de faibles valeurs. On l'observe principalement sur les rivières de largeur notable dont le lit est formé de bancs de sable. L'augmentation des pertes par évaporation par rapport au débit intervient à partir du moment où les bancs de sable sont découverts, car

l'évaporation s'exerce alors non seulement sur la surface offerte par l'écoulement, mais aussi sur la surface de sable atteinte par la frange capillaire de la nappe alluviale.

La forme caractéristique de la décroissance des débits pendant le tarissement et pendant l'épuisement permet de localiser ces deux épisodes sur l'hydrogramme et en particulier de déterminer les débits correspondant au début du tarissement (débits de charnière  $Q_0$ ) et ceux correspondant au début de l'épuisement ( $Q'_0$ ). Les lois de tarissement et d'épuisement sont entièrement déterminées par ces valeurs  $Q_0$  et  $Q'_0$  et par leurs coefficients de décroissance respectifs  $k$  et  $k'$ .

La courbe de tarissement représente les apports d'origine exclusivement souterraine et permet de définir le volume drainable des réserves du bassin à une date quelconque du tarissement ou un peu antérieure à l'apparition de ce dernier. Ce volume a pour expression  $\frac{Q_0}{k}$  (volume que les réserves restitueraient au cours d'eau si la période de basses eaux se poursuivait indéfiniment).

Lorsqu'il y a épuisement, le volume écoulé à la station :  $\frac{Q_0 - Q'_0}{k} + \frac{Q'_0}{k'}$ , est évidemment inférieur au volume utile des réserves souterraines, mais permet toujours de l'évaluer.

L'étude du tarissement revêt en fait deux aspects.

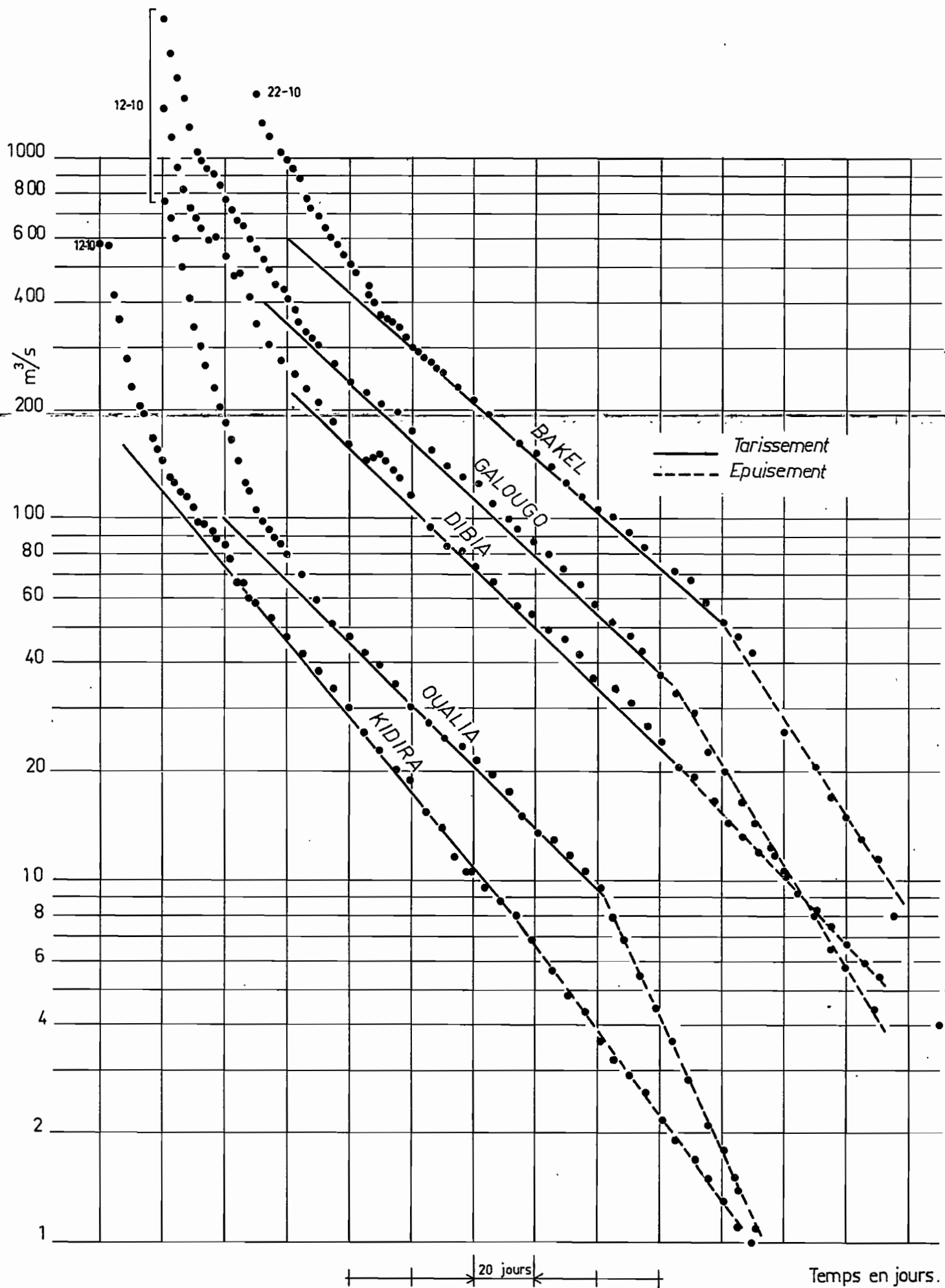
- 1° L'étude des coefficients de tarissement qui permet de caractériser l'aptitude à la vidange du bassin, laquelle est liée à la structure des terrains aquifères.
- 2° L'étude des débits spécifiques de tarissement qui permet de déterminer l'importance des réserves souterraines.

#### II.5.2. Coefficients de tarissement

Le calcul des coefficients de tarissement (et d'épuisement s'il y a lieu) peut être considéré comme définitif

# Courbes de tarissement caractéristiques

( Année 1956-57 )



pour la plupart des stations vu que le nombre d'années étudiées est relativement élevé (entre 6 et 15 années suivant les stations) et que les débits utilisés sont connus avec assez de précision (tarage bien défini dans l'intervalle considéré grâce à l'existence de jaugeages de très basses eaux). C'est à TOUKOTO que les résultats sont les plus imprécis (6 années d'observations et relevés suspects pour certaines d'entre elles).

On a rassemblé dans le tableau n° 3-32 les valeurs médianes des coefficients  $k$  et  $k'$  pour les différentes stations du Haut-bassin et de la Vallée. On a indiqué également le nombre de jours  $N$  (et  $N'$  pour l'épuisement) que met le débit pour descendre de 10 à 1, nombre lié au coefficient  $k$  par la relation  $k.N = 2,3026$ , quantité égale à  $(\log e)^{-1}$ , et qui est plus parlant que le coefficient  $k$ .

On a indiqué en outre les valeurs médianes des débits  $Q_0$  et  $Q'_0$  qui correspondent respectivement à l'apparition du tarissement et à celle de l'épuisement. Ce tableau montre la remarquable homogénéité du tarissement des différents bassins notamment aux stations aval du BAFING et du BAKOYE et à celles situées sur le SENEGAL ( $0,0185 < k < 0,020$ ).

C'est entre les vitesses de tarissement du BAFING et celles de la FALEME que l'écart est le plus notable. Pour des bassins versants du même ordre (BAFING à DAKKA-SAÏDOU et FALEME à GOURBASSI) la décroissance des débits est nettement plus lente sur le BAFING que sur la FALEME (coefficients de tarissement respectifs : 0,014 et 0,020). L'écart est d'autant plus remarquable que la capacité de rétention du BAFING supérieur est d'environ le triple de celle de la Haute-FALEME. Il semble que cette différence de comportement à la vidange de ces 2 bassins ne soit pas imputable à leur géologie, mais ait pour origine une épaisseur d'altération plus forte sur le BAFING que sur la FALEME, aboutissant à la formation de nappes profondes dont le débit est faible eu égard au volume d'eau emmagasiné, mais soutenu. Sur le bassin de la FALEME, relativement moins arrosé, l'altération est peu importante et les nappes mieux drainées.

Tableau n° 3-32

CARACTERISTIQUES de TARISSEMENT

Rivière	Station	Tarisement			Epuisement			Nombre d'années d'observations
		k	N jours	Q <sub>0</sub> m <sup>3</sup> /s	k'	N' jours	Q' <sub>0</sub> m <sup>3</sup> /s	
BAKOYE	TOUKOTO	(0,024)	(95)	(45)				6
	OUALIA (ou KALE)	0,020	117	90	0,046	50	9	11
BAFING	DAKKA-SAÏDOU	0,014	160	90				7
	DIBIA (ou DEGURPE)	0,020	114	140				8
FALEME	FADOUGOU	0,020	114	80				7
	GOURBASSI	0,020	115	80				10
	KIDIRA	0,024	96	100	0,035	66	3,5	14
SENEGAL	GALOUGO (ou GOUINA)	0,0185	124	260	0,038	60	40	14
	KAYES	0,0185	124	300	0,037	62	54	14
	BAKEL	0,0185	125	325	0,048	48	40	15
	MATAM	0,0185	123	340	0,046	50	40	14
	KAEDI	0,0185	125	360	0,041	56	42	6
	DIOULDE-DIABE (SENEGAL+DOUE)	0,0185	123	380	0,037	62	45	6

On note également que les coefficients de tarissement du BAFING et de la FALEME augmentent sensiblement de l'amont vers l'aval. L'analyse montre que cette variation est due essentiellement aux pertes par évaporation dans le lit des deux cours d'eau et non à une différence de comportement à la vidange de leur partie amont par rapport à leur partie aval. Cette affirmation est justifiée par le fait que, comme on le verra plus loin, les réserves souterraines sont localisées dans la moitié supérieure des bassins. On doit donc considérer que la moitié aval n'a pratiquement aucune action sur le coefficient de tarissement, lequel, en l'absence des pertes par évaporation, garderait la même valeur tout au long du cours d'eau.

La diminution du coefficient de tarissement de l'amont vers l'aval sur la BAKOYE (évolution inverse de celle observée sur le BAFING et la FELEME) n'est pas invraisemblable mais ne peut être considérée comme une donnée définitive, compte tenu de la faible précision avec laquelle le coefficient de tarissement est connu à TOUKOTO.

Sur le SENEGAL moyen et dans la Vallée, le coefficient de tarissement est légèrement inférieur à ceux observés dans le Haut-Bassin aux stations aval des divers affluents. Il conserve la même valeur de GALOUGO à DIOULDE-DIABE, ce qui tend à montrer que les pertes par évaporation pendant la période de tarissement sont compensées par les apports de la nappe alluviale. Difficiles à détecter pendant la période de tarissement, ces apports sont mis en évidence de façon très nette dans la Vallée pendant la période d'épuisement par la diminution sensible du coefficient  $k'$  à l'aval de BAKEL et par le renforcement du débit d'étiage qui en résulte (renforcement de  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  environ entre BAKEL et DIOULDE-DIABE). Leur estimation tout au long de la période d'épuisement montre qu'il s'agit d'une alimentation soutenue : débit de l'ordre de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  pour le bief BAKEL - DIOULDE-DIABE.

### II.5.3. Capacité de rétention

La seule donnée accessible est le volume drainable des réserves souterraines et c'est ce volume, considéré à une époque pas trop éloignée de celle où les réserves sont maximales, que nous avons adopté comme définition de la capacité de rétention. En pratique, on est conduit à considérer le



Tableau n° 3-33

VOLUMES DRAINABLES au DEBUT du PARISSEMENT

Stations	$Q_1$ m <sup>3</sup> /s	$q_1$ l/s/km <sup>2</sup>	$V_1$ 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	$H_1$ mm	B.V. km <sup>2</sup>
TOUKOTO	30	1,8	105	6,4	16 500
OUALIA	45	0,5	200	2,4	84 700
DAKKA-SAÏDOU	106	6,7	635	40,4	15 700
DIBIA	160	4,8	715	21,4	33 500
FADOUGOU	42	4,5	185	19,9	9 300
GOURBASSI	42	2,4	192	11,2	17 100
KIDIRA	45	1,6	165	5,7	28 900
GALOUGO	245	1,9	1140	8,9	128 400
KAYES	250	1,6	1170	7,4	157 400
BAKEL	300	1,4	1410	6,5	218 000
KAEDI	340	1,35	1600	6,3	253 000
DIOULDE-DIABE	370	1,42	1735	6,7	260 000



C'est cette 2ème forme d'apports qui est en grande partie responsable de l'accroissement des volumes drainés à l'aval de KAYES.

Il faut donc se garder d'interpréter cet accroissement comme résultant d'apports souterrains. On constate en effet, en ce qui concerne la Vallée, que l'augmentation des apports d'une station à l'autre est égal au volume stocké dans le bief qu'elles délimitent : volume égal à la cubature de ce bief pour le plan d'eau correspondant au débit de 300 m<sup>3</sup>/s à BAKEL. C'est ainsi que nous avons vérifié l'équivalence entre l'accroissement du volume drainé et la cubature du bief pour les tronçons BAKEL-KAEDI et BAKEL - DIOULDE-DIABE.

Les profils en travers qui ont été relevés dans la Vallée permettent de calculer cette cubature avec une précision acceptable : 180 millions de m<sup>3</sup> pour le bief BAKEL-KAEDI et 300 millions de m<sup>3</sup> pour le bief BAKEL - DIOULDE-DIABE.

#### II.5.4. Relation tarissement-propagation

Il apparaît ainsi que les conditions de tarissement dans la Vallée résultent essentiellement de la propagation des débits de l'amont vers l'aval. Cela nous fournit l'occasion d'établir la relation entre tarissement et propagation qui présente un certain intérêt étant donné que les formules de propagation que cette relation permet d'établir ont un domaine d'utilisation plus étendu que celui du tarissement.

La formule de propagation dans le bief BAKEL-DAGANA a déjà été établie. Nous nous bornerons ici à l'étude des conditions de propagation dans les biefs BAKEL-KAEDI et BAKEL - DIOULDE-DIABE.

En conservant les notations définies précédemment, la différence entre le volume drainé à BAKEL, du début du tarissement à la fin de l'étiage, et le volume correspondant à une station située à l'aval, KAEDI par exemple, est donnée par la formule :

$$\Delta V = \frac{Q_1 \text{ KAEDI} - Q_1 \text{ BAKEL}}{k}$$

(k : coefficient de tarissement qu'on peut considérer comme constant tout au long de la Vallée et égal à 0,0185).

Mais, on peut l'exprimer également par la formule du stockage dans le bief :  $S = Kq$ , obtenue à partir des variations respectives du débit aux deux stations pendant le tarissement (méthode de MUSKINGUM). Pour les 2 biefs considérés, on est amené à prendre pour débit pondéré  $q$ , la moyenne arithmétique des débits amont et aval, d'où l'expression du déstockage qui s'effectue au cours du tarissement, si on considère par exemple le bief BAKEL-KAEDI :

$$S = K \cdot \frac{Q_1 \text{ KAEDI} + Q_1 \text{ BAKEL}}{2}$$

En écrivant que cette quantité est égale à la précédente, on obtient la valeur de  $K$  :

$$K = \frac{2}{k} \frac{Q_1 \text{ KAEDI} - Q_1 \text{ BAKEL}}{Q_1 \text{ KAEDI} + Q_1 \text{ BAKEL}}$$

L'écart entre les volumes drainés à BAKEL et à une station située à l'aval pendant le tarissement s'exprime aussi bien à partir des débits  $Q_1$  et du coefficient  $K$ , qu'à partir des débits  $Q_1$  et du coefficient de tarissement. Mais, l'utilisation du coefficient  $K$ , dans le premier cas, permet de représenter cet écart par la même fonction que celle qui représente la cubature du bief ( $S' = K'q$ ), ce qui rend immédiat la comparaison de ces 2 grandeurs.

Pour les 2 biefs étudiés, les valeurs de  $K$ , tirées des données du tarissement, s'identifient à celles calculées à partir de la cubature du bief ( $K = K'$ ). On trouve :

$K = 6,8$  pour le bief BAKEL-KAEDI et

$K = 11,3$  pour le bief BAKEL - DIOULDE-DIABE.

Ces valeurs rejoignent d'ailleurs celles qu'on obtient graphiquement à partir des relevés des dernières années (période 1959-64).

On en déduit les formules de propagation correspondant à chaque bief, lesquelles se présentent sous la forme suivante :

$$Q_B^1 = C_0 Q_A^1 + C_1 Q_A^0 + C_2 Q_B^0$$

où  $Q_A^0$  et  $Q_B^0$  représentent respectivement les débits à l'entrée et à la sortie du bief à l'instant zéro.

$Q_A^1$  et  $Q_B^1$  les débits dans les mêmes sections à l'instant 1 séparé de l'instant zéro par la durée  $t$ , cette dernière étant obligatoirement inférieure au temps de propagation de la crue dans le bief considéré.

Connaissant l'hydrogramme à l'entrée du bief et le débit à la sortie du bief à l'instant zéro, la formule précédente permet de calculer le débit  $Q_B^1$  sortant du bief à l'instant 1, débit dont la valeur sert de point de départ au calcul de  $Q_B^2$  etc ... On peut ainsi, de proche en proche, déduire l'hydrogramme à la sortie du bief de l'hydrogramme à l'entrée.

Les coefficients  $C_0$ ,  $C_1$  et  $C_2$  sont déterminés entièrement par le coefficient  $K$  et les paramètres  $x$  et  $t$  comme l'indiquent les formules ci-dessous :

$$C_0 = - \frac{Kx - 0,5 t}{K(1-x) + 0,5 t}$$

$$C_1 = \frac{Kx + 0,5 t}{K(1-x) + 0,5 t}$$

$$C_2 = \frac{K(1-x) - 0,5 t}{K(1-x) + 0,5 t}$$

Le tableau n° 3-34 donne les valeurs de ces coefficients pour les biefs étudiés,  $t$  étant pris égal à 1 jour.

Une des principales applications de ces résultats est la détermination de l'hydrogramme à DAGANA pendant la période où l'écoulement est soumis à l'influence de la marée.

Tableau n° 3-34

VALEUR des COEFFICIENTS DEFINISSANT la  
PROPAGATION des DEBITS dans la VALLEE  
en l'ABSENCE de DEBORDEMENTS

Bief	$C_0$	$C_1$	$C_2$	Observations
BAKEL - KAEDI	- 0,74	1	0,74	K = 6,8
KAEDI - DIOULDE-DIABE	- 0,64	1	0,64	K = 4,5
DIOULDE-DIABE - DAGANA	- 0,43	1	0,43	K = 2,5
BAKEL - DIOULDE-DIABE	- 0,84	1	0,84	K = 11,3
BAKEL - DAGANA	- 0,20	0,28	0,92	K = 15 x = 0,2

x = 0,5

### CHAPITRE III

#### PROPAGATION de la MAREE

#### REMONTEE CYCLIQUE des EAUX MARINES

Les problèmes concernant la marée et la pénétration de l'eau salée dans le Delta ont fait l'objet d'une étude publiée par l'ORSTOM en 1964 sous le titre "Remontée des eaux marines dans le SENEGAL". Nous présentons dans ce chapitre les résultats essentiels de cette étude.

Le lit du fleuve, sur une longueur de 450 km depuis l'embouchure, se situe nettement en dessous du niveau moyen de l'Océan. Il en résulte pour les sections du Delta et de la Basse-Vallée une situation particulière créée par la présence de deux forces antagonistes : le débit du fleuve d'une part et la poussée océanique d'autre part. Cette dernière tend à imposer un régime cyclique à écoulement fluvial. Au problème de l'influence de la marée sur l'écoulement s'ajoute celui du comportement réciproque des eaux marines et des eaux fluviales. Avant d'examiner en détail ces deux aspects de l'interaction fleuve-océan, nous rappellerons les caractéristiques relatives à la marée et à sa propagation.

#### III.1. - Caractéristiques relatives à la marée et à sa propagation

On sait que les oscillations de la marée sont constituées d'ondes sinusoïdales très nombreuses d'origines astronomique et géographique et comme telles revêtent une rigueur mathématique.

La marée dépend également des conditions météorologiques (pression atmosphérique - vents) dont les effets se traduisent par une évolution irrégulière de son niveau moyen.

Les variations cycliques de la marée et l'évolution de son niveau moyen apparaissent les unes et les autres intéressantes à considérer et nous les décrirons successivement.

### III.1.1. Marée à l'embouchure

La marée à SAINT-LOUIS est du type semi-diurne. L'installation temporaire d'un marégraphe sur la plage de SAINT-LOUIS a permis d'établir la corrélation entre l'amplitude de la marée à SAINT-LOUIS et celle de la marée à DAKAR. On en a déduit que l'amplitude moyenne de la marée à l'embouchure est de 1,15 m en vive-eau et de 0,55 m en morte-eau.

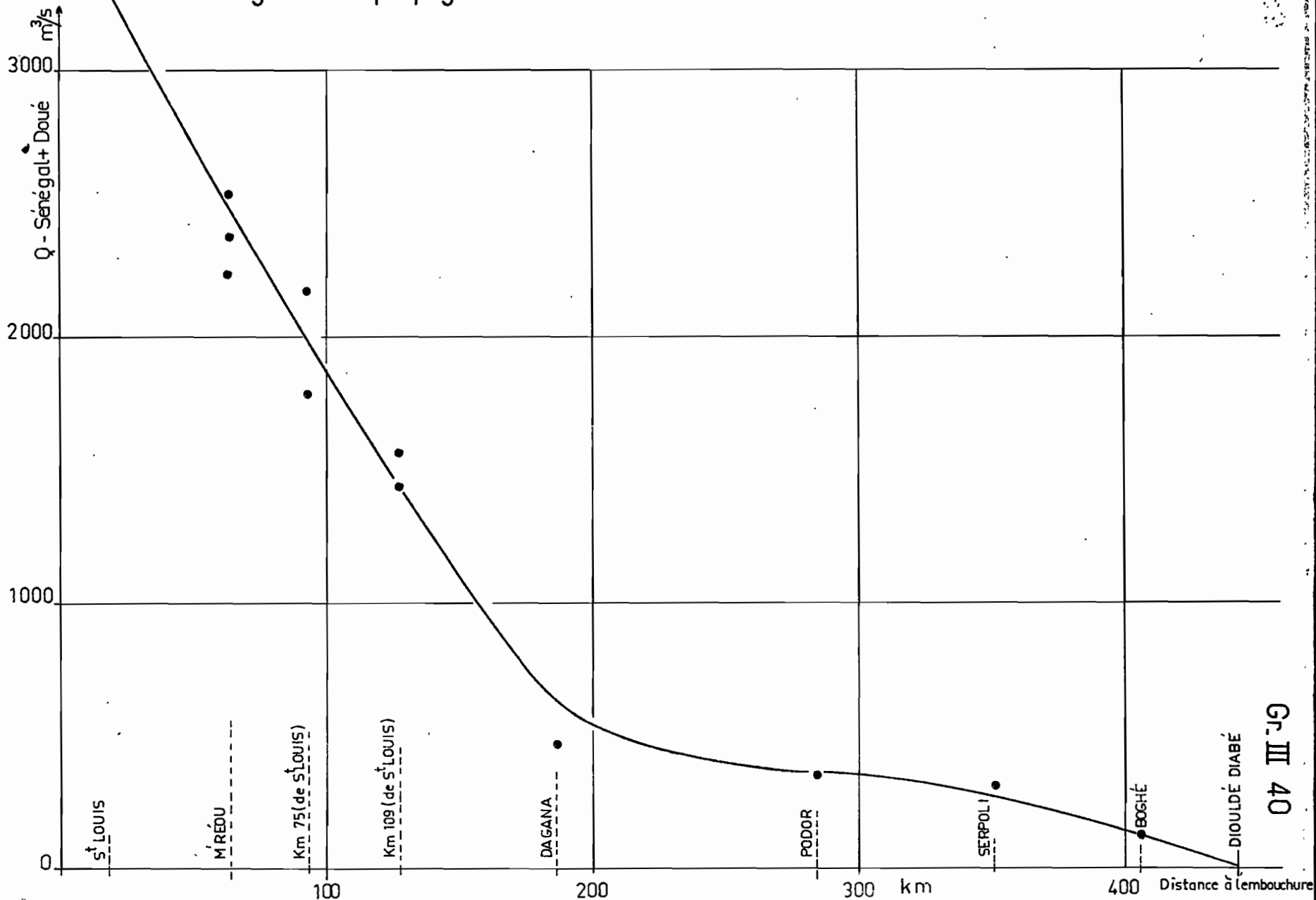
### III.1.2. Propagation de la marée

#### a) Amortissement :

La marée fluviale résulte de la propagation de la marée océanique, mais cette propagation, en considérant une onde de marée d'amplitude donnée à l'embouchure, dépend du débit fluvial. Plus ce débit est élevé, plus l'amortissement de l'onde considérée est importante et plus la longueur du bief soumis à cette onde est faible. Le graphique n° III-40 donne la limite de propagation dans le fleuve d'une onde de marée d'amplitude moyenne en fonction du débit fluvial.

L'amortissement de la marée de l'aval vers l'amont a été étudié uniquement en période de basses eaux. Le graphique n° III-41 donne cet amortissement pour des marées à l'embouchure de diverses amplitudes. La réduction d'amplitude, relativement à la distance parcourue, décroît de l'aval vers l'amont et est plus importante en vive-eau qu'en morte-eau. Elle est maximale entre la Mer et GANDIOLE (réduction de 33 % pour la marée moyenne de vive-eau et de 20 % pour la marée moyenne de morte-eau). Cet écart s'explique par la présence de la barre qui crée une perte de charge importante au jusant. L'amortissement est plus faible entre GANDIOLE et SAINT-LOUIS (7 % environ) et diminue encore à l'amont notamment à partir de DIAOUAR.

# Longueur de propagation de la marée en fonction du débit fluvial



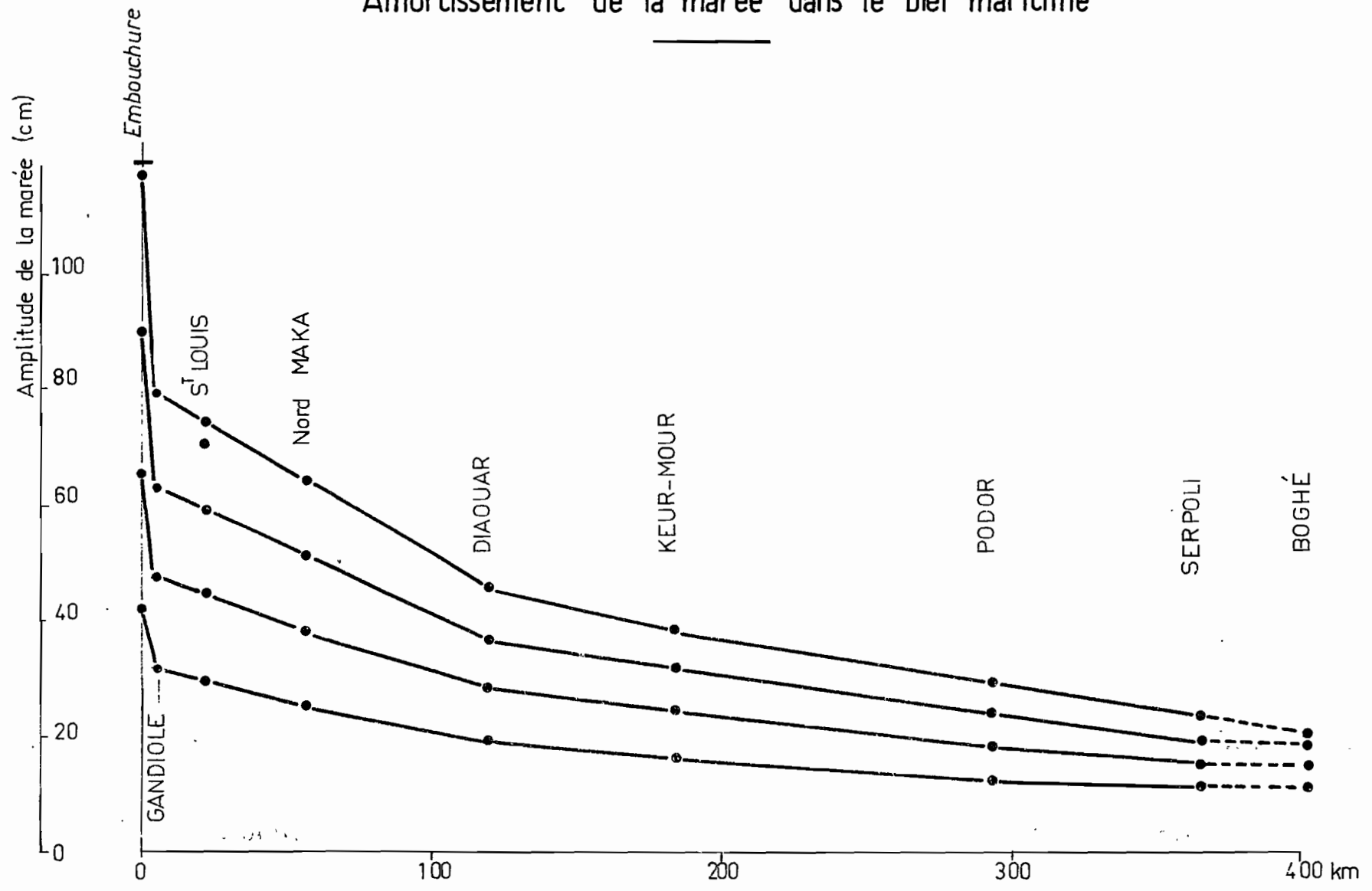
Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer

4.7.67

SEN 41.254

Gr. III 40

# Amortissement de la marée dans le bief maritime



b) Temps de propagation :

Comme pour l'amortissement, les données recueillies concernent uniquement la période d'étiage. Le tableau n° 3-35 récapitule les résultats obtenus (temps de propagation comptés à partir de l'embouchure). Les temps de propagation des minimums sont légèrement plus longs que les temps de propagation des maximums. Cela correspond au fait que l'onde de marée se déforme en se propageant (accroissement sensible de la durée du pendant par rapport à celle du montant). La vitesse de propagation croît de 11 à 25 km/heure entre SAINT-LOUIS et RICHARD-TOLL. Elle a plutôt tendance à décroître ensuite (vitesse de l'ordre de 20 km/heure).

III.1.3. Niveau moyen

Les variations journalières du niveau moyen de la mer, qui coïncide pratiquement avec le niveau de mi-marée, sont relativement importantes et parfaitement aléatoires. En particulier, on ne décele pas dans ses variations d'ondes périodiques correspondant aux variations bimensuelles d'amplitude de la marée. On constate par contre la présence d'une onde de longue période (100 jours environ) mais de faible amplitude.

A SAINT-LOUIS, le niveau de mi-marée présente (de Janvier à Juillet 1963) des maximums compris entre + 0,06 et + 0,26 IGN et des minimums compris entre - 0,10 et - 0,02 IGN. Les vitesses de variation sont parfois notables et atteignent 10 cm en 24 heures. Ces fluctuations se propagent dans le fleuve et voient leur amplitude augmenter sensiblement de l'aval vers l'amont. Toutefois, la correspondance des niveaux moyens, par couple de stations, est loin d'être rigoureuse. Il en résulte que le profil moyen de la ligne d'eau du fleuve dans le bief maritime, en période d'étiage, n'est pas lié de façon étroite au niveau moyen en mer.

Les variations du niveau moyen à l'embouchure, en se propageant dans le fleuve, donnent naissance à un écoulement qui se superpose à l'écoulement naturel observé à l'amont. Compte tenu de l'étendue de la surface libre du bief maritime (193 km<sup>2</sup> à l'embouchure), ce débit complémentaire est loin d'être négligeable par rapport au débit d'étiage (une variation de 1 cm/jour détermine un écoulement de 22,3 m<sup>3</sup>/s à l'embouchure).

Tableau n° 3-35

TEMPS de PROPAGATION de la MAREE

Stations	Distance à l'embouchure (km)	Temps de propagation		Vitesse partielle de propagation (m/s) (marée haute)
		Marée haute	Marée basse	
GANDIOLE	2,5	20'	(25')	2,08
SAINT-LOUIS	18	1h35'	1h45'	3,44
MAKA	51	3h05'	3h20'	6,11
DEBI	81	4h45'	4h55'	5,00
DIAOUAR	115	6h15'	6h40'	6,30
RICHARD-TOLL	158	8h00'	8h20'	6,82
PODOR	285	(15h)		(5,03)
BOGHE	397	(20h30')		(5,65)

### III.2. - Régime hydraulique dans le bief maritime

La poussée océanique confère au débit fluvial un régime périodique de même période que la marée. L'onde de débit se propage dans le fleuve à la même vitesse que l'onde de marée et subit un amortissement du même ordre. Elle est toujours en avance sur l'onde de marée qu'elle précède d'une heure environ. Elle est caractérisée par son amplitude : différence algébrique du débit maximal de jusant, compté positivement et du débit maximal de flot compté négativement (où éventuellement du débit minimal de jusant) et par son débit moyen (moyenne algébrique des débits précédents) qui correspond au débit du fleuve à l'amont du bief, corrigé de l'influence du niveau moyen dans la section considérée.

Cette définition de l'écoulement considère le débit qui résulte de l'intégration des vitesses dans la section et ne rend compte ni de la distribution ni du sens de ces vitesses.

Or, sur une certaine longueur du bief maritime, l'écoulement s'effectue en milieu hétérogène, formé par la superposition de couches liquides de densités différentes. Il en résulte une certaine distorsion dans la répartition verticale des vitesses. Ces dernières présentent une évolution synchrone au cours d'une période de marée (croissance et décroissance simultanées), mais leur direction n'est pas constamment la même le long d'une verticale. On est amené à considérer l'écoulement comme formé d'écoulements horizontaux superposés présentant chacun des caractéristiques différentes en ce qui concerne la vitesse moyenne au cours d'une période, laquelle croît du fond à la surface (elle est le plus souvent négative au fond, c'est-à-dire dirigée vers l'amont) et le rapport des durées de jusant et de flot, lequel croît également du fond à la surface. Cette différenciation de l'écoulement en fonction de la profondeur, plus ou moins accusée suivant la valeur du gradient vertical de salinité, est à la base de l'évolution des eaux marines dans le delta.

En définitive, le débit moyen dans une section au cours d'une période de marée intègre les débits linéaires moyens horizontaux, dont la répartition verticale, à laquelle correspond un certain gradient de débit, constitue la caractéristique essentielle de l'écoulement.

Pour un débit amont donné, l'action conjuguée des gradients verticaux de débit et de salinité conduit à un état d'équilibre caractérisé par un certain gradient longitudinal de salinité. L'équilibre correspondant à un débit fluvial élevé implique un gradient de débit élevé, donc une forte stratification des eaux. Il sera caractérisé par une faible pénétration de la salure.

Un raisonnement analogue montre qu'un débit fluvial faible conduit à une pénétration importante de la salure. Cette influence du débit amont sur la répartition spatiale de la salinité sera précisée dans les paragraphes suivants.

### III.3. - Evolution spatio-temporelle de la salinité

#### III.3.1. Caractères généraux de la répartition spatiale de la salinité

##### a) Répartition dans une section du fleuve

La salinité le long d'une verticale augmente avec la profondeur. Cette augmentation est rarement régulière. Le plus souvent, on observe une variation importante à une certaine profondeur qu'on caractérise au moyen d'un paramètre appelé paramètre de stratification.

Transversalement la salinité, à profondeur égale, varie très peu.

##### b) Répartition longitudinale

L'inclinaison des courbes isohalines et les intervalles qui les séparent varient dans des proportions importantes avec l'abscisse.

En moyenne, la salinité décroît assez régulièrement de l'aval vers l'amont et du fond à la surface. Mais localement et dans le sens longitudinal, les formes de décroissance sont très variables et des inversions peuvent se produire.

### III.3.2. Evolution de la salinité au cours d'une période de marée

L'évolution de la salinité dans une section au cours d'une période dépend de sa répartition longitudinale de part et d'autre de la section considérée et en reflète les singularités. D'où l'impossibilité de relier cette évolution à la marée et d'introduire, pour une section, la notion de marée de salinité, caractérisée par un maximum et un minimum se produisant au moment des renverses de courant.

L'étude de l'évolution de la salinité au cours d'une période de marée revient à l'étude des déformations des courbes isohalines dans un plan longitudinal. A titre d'exemple, nous donnons (graphique n° III-42) les configurations extrêmes de ces courbes telles qu'elles ont été observées le 13 mai 1963 dans le bief DIAOUAR-ROSSO, lors de 2 renverses successives. L'évolution constatée reflète bien la distorsion verticale de l'écoulement pendant le jusant (l'excursion en surface, proportionnelle à la vitesse moyenne en surface dans l'intervalle de temps considéré, est plusieurs fois supérieure à l'excursion au fond).

### III.3.3. Variations cycliques bi-mensuelles de la salinité

L'évolution la plus importante à caractériser est celle de la répartition spatiale observée à un instant donné du cycle de marée. Abstraction faite de l'influence du débit fluvial qui sera analysé plus loin et qui se traduit par un déplacement progressif des courbes isohalines, on constate que ces dernières subissent des déformations périodiques correspondant au cycle bimensuel de la marée. Les déformations sont d'autant plus importantes que le stade de pénétration saline est moins avancé. Dans ce cas, les formes évoluent entre deux configurations extrêmes :

- une configuration dite de stratification maximale consécutive à la période de marnage faible (marées de morte-eau) et caractérisée par une faible inclinaison des isohalines et une pénétration de la salure (accroissement du gradient vertical de débit). La pente moyenne des isohalines est de 25 cm/km. On est pratiquement en présence d'un coin salé ;

- une configuration qui correspond aux conditions maximales de mélange consécutives aux marées de vive-eau et qui affecte plus spécialement la région amont du bief salé. Cette phase est caractérisée par un redressement des courbes isohalines dont la pente varie de 0,6 m/km à l'embouchure à 2,5 m/km à l'extrémité amont du bief salé et par un retrait de la salure (diminution du gradient vertical de débit).

Pour une pénétration saline supérieure à 100 km, les configurations extrêmes précédentes voient leurs divergences s'atténuer et on peut considérer que la répartition spatiale de la salinité est pratiquement indépendante des variations d'amplitude de la marée.

#### III.4. - Représentation graphique de l'évolution de la salinité - Etablissement de la relation salinité-débit fluvial

On s'est intéressé jusqu'ici à la répartition de la salinité dans l'espace à 2 dimensions. Pour l'interprétation quantitative de son évolution, il convient de réduire cet espace à une dimension en adoptant comme variable la valeur moyenne journalière de la salinité dans une section. Le report graphique des salinités moyennes instantanées relevées régulièrement au moment des reverses conduit à une détermination assez précise de l'évolution de la salinité moyenne journalière.

Le graphique n° III-43 donne l'évolution observée successivement dans un certain nombre de sections du bief SAINT-LOUIS - DAGANA au cours de la période du 15 Décembre 1962 au 15 Août 1963, et celle des 3 facteurs qui la conditionnent :

- le débit à l'amont du bief maritime,
- le niveau moyen à l'embouchure,
- l'amplitude de la marée à SAINT-LOUIS.

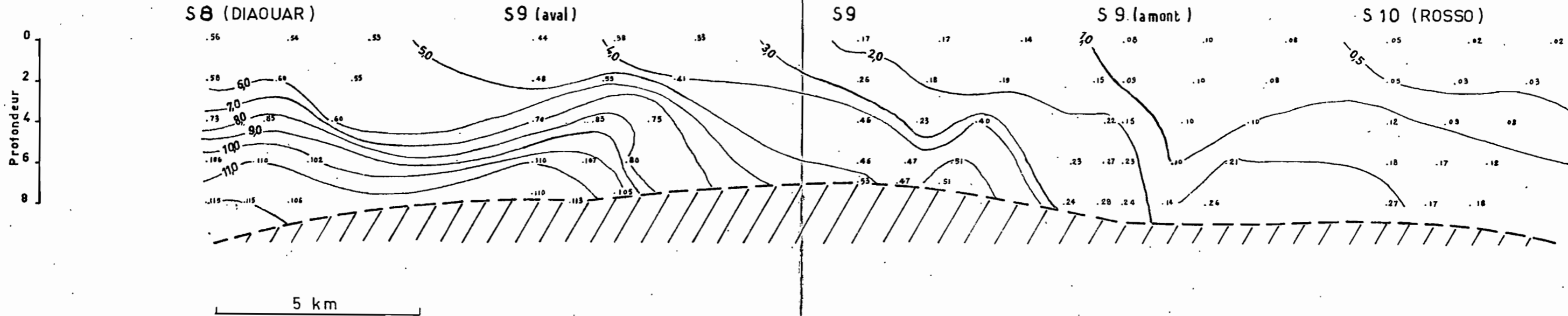
Gr. III 42

Répartition de la salinité  
entre DIAOUAR et ROSSO

13 MAI 1963

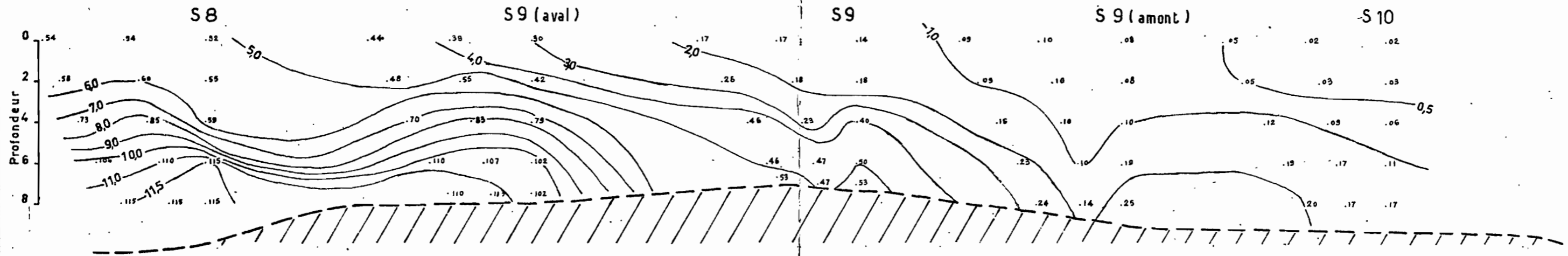
1

Situation à 9 h (heure moyenne de la fin du flot)



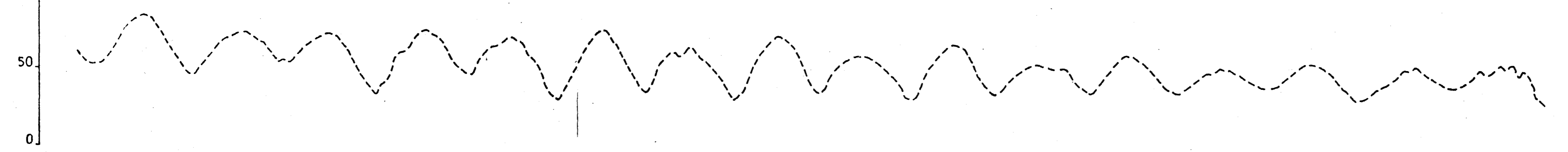
2

Situation à 16 h (heure moyenne de la fin du jusant)

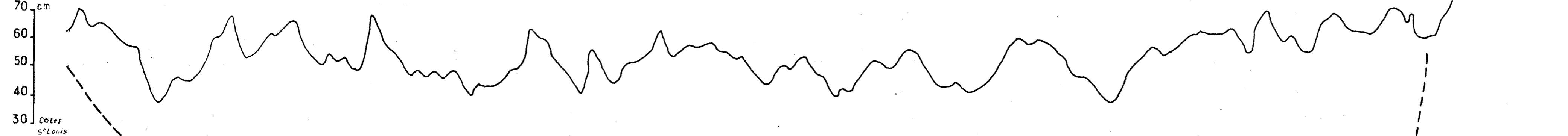


# Diagrammes évolution comparés

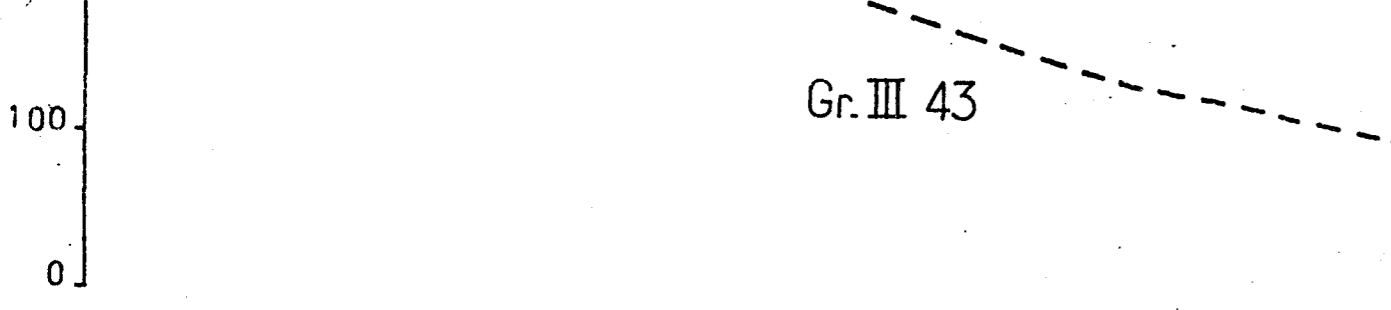
100 cm AMPLITUDE DE LA MARÉE A ST LOUIS



70 cm NIVEAU MOYEN A L'EMBOUCHURE



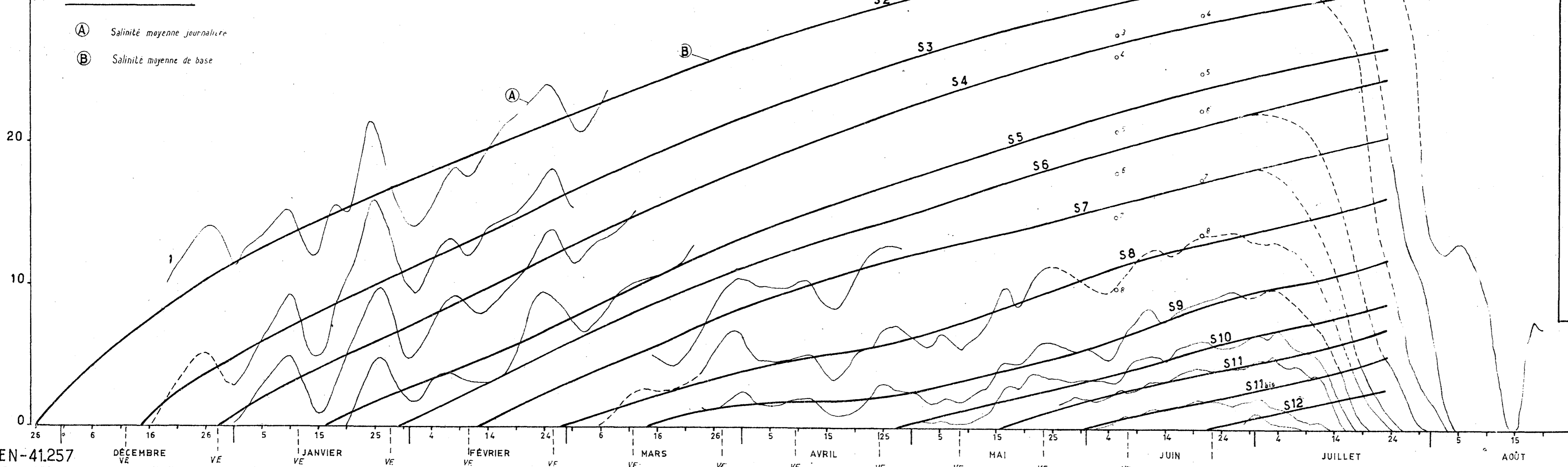
200 m³ DÉBIT JOURNALIER



Gr. III 43

30 gr/l SALINITÉ MOYENNE

(A) Salinité moyenne journalière  
(B) Salinité moyenne de base



- S 2 : Saint LOUIS
- S 3 : Confluent GUEYLOUBÉ
- S 4 : Nord MAKA
- S 5 : Confluent GOROM
- S 6 : DEBI
- S 7 : N'DERIE
- S 8 : DIAOUAR
- S 9 : BREUNE
- S 10 : ROSSO
- S 11 : RICHARD-TOLL
- S 11 : MBILOR
- S 12 : DAGANA

L'influence du débit fluvial, supposé agissant seul, est représenté par le réseau des courbes "moyennes" obtenues en "polissant" les courbes réelles d'évolution de la salinité moyenne. En effet, les actions du marnage et du niveau moyen ont, chacune en ce qui les concerne, une résultante nulle, ce qui justifie le tracé adopté pour éliminer leur influence.

L'établissement, à partir de ces courbes moyennes et de l'hydrogramme à l'amont du bief maritime, de la relation liant la salinité le long du fleuve au débit fluvial peut s'envisager si on admet que l'évolution observée correspond à une succession d'états d'équilibre. Cette condition est réalisée quand le débit fluvial est relativement élevé et varie lentement. Elle ne l'est plus quand le débit est faible puisque à la limite (débit nul - bief salé sur toute sa longueur et salure égale à celle de la mer), l'équilibre ne serait atteint qu'au bout d'un temps infini.

Il existe donc une valeur du débit fluvial en dessous de laquelle l'évolution de la salinité dépend essentiellement du temps.

Cette valeur limite du débit fluvial est assez délicate à déterminer. Nous l'avons fixée arbitrairement à  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  : valeur volontairement élevée, pour tenir compte de l'avantage que présente la substitution du paramètre "temps" au paramètre "débit" quand ce dernier ne peut être déterminé avec précision à cause de l'évaporation.

La salinité moyenne à la distance  $x$  de l'embouchure, en fonction du débit pour les valeurs supérieures à  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  et en fonction du temps pour les débits inférieurs, est donnée par les diagrammes I et II (graphiques n° III-44 et III-45).

Le diagramme I permet de déterminer la limite aval du pompage dans le Fleuve dans l'hypothèse d'un régime permanent obtenu en renforçant le débit naturel à l'étiage, en considérant, soit la courbe de salinité nulle, soit celle correspondant à la salinité maximale admissible, et en majorant les abscisses pour tenir compte des fluctuations du marnage et du niveau moyen.

Les données concernant le pompage d'eau douce s'établissent comme suit :

Débit m <sup>3</sup> /s	Limite aval du pompage km	Position sur le fleuve
50	140	5 km à l'aval de ROSSO
100	115	DIAOUAR
150	90	au droit de KEUR-MACENE
200	75	3 km en amont de TIGUET
300	58	partie Sud de l'île de N'TIENG
400	45	DIAMA
500	37	confluent GUEYLOUBE

### III.5. - Retrait de la salure

Pendant la phase de retrait, les variations du débit fluvial sont trop rapides pour qu'on puisse considérer, comme on l'a fait pour l'intrusion saline, que l'évolution de salinité correspond à une succession d'états d'équilibre. Comme d'autre part, l'écoulement est suffisamment abondant pour provoquer un retrait continu de la salure, ce dernier sera, à de rares exceptions près, systématiquement en retard par rapport à l'évolution théorique résultant de la relation fondamentale liant la salinité au débit.

ORSTOM

A0

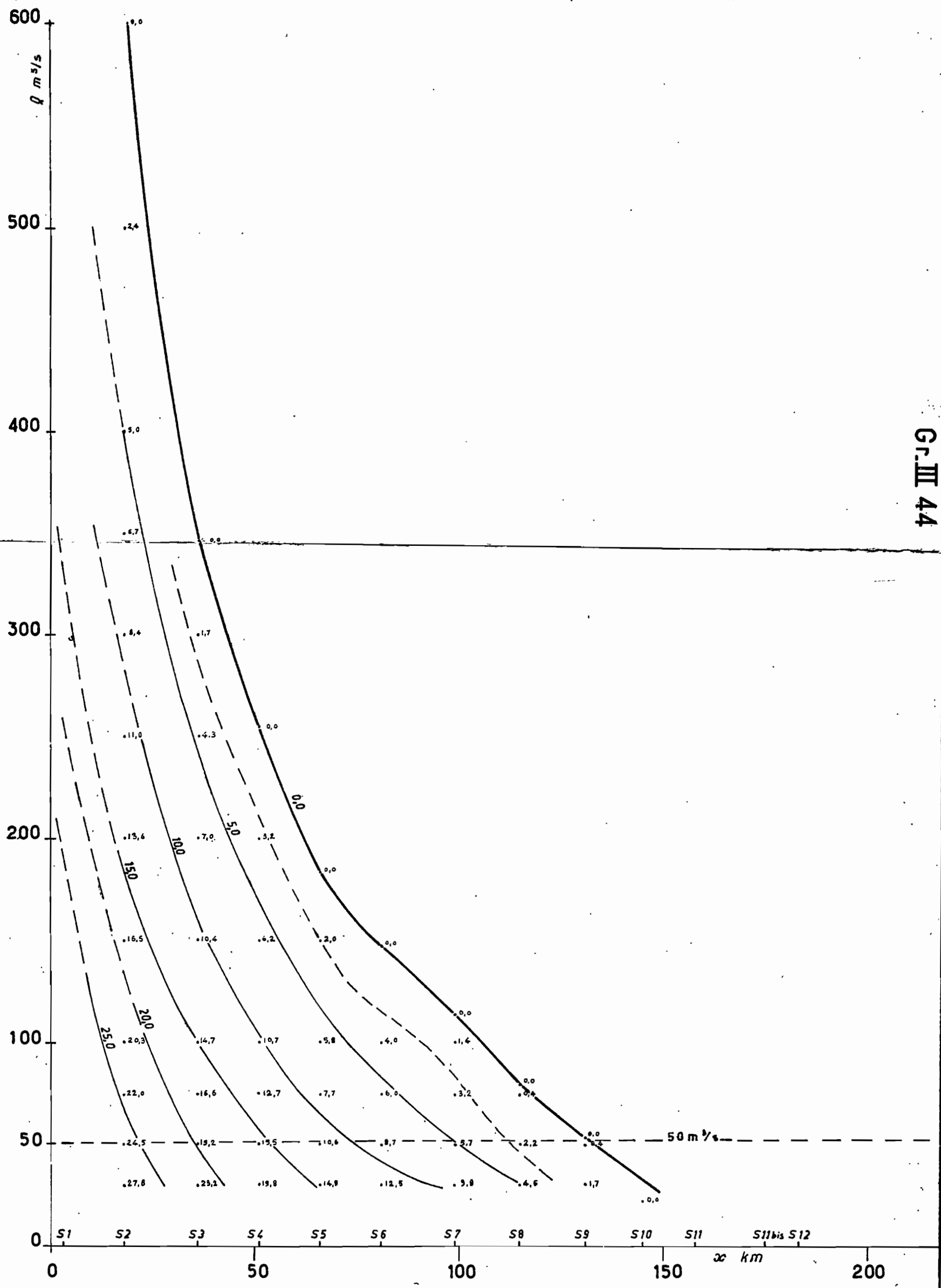
DATE 24.3.64

DESSINE Guillemet J.

SEN-41258

# Diagramme I

## Relation Débit-Salinité moyenne de base ( $Q > 50 \text{ m}^3/\text{s}$ )

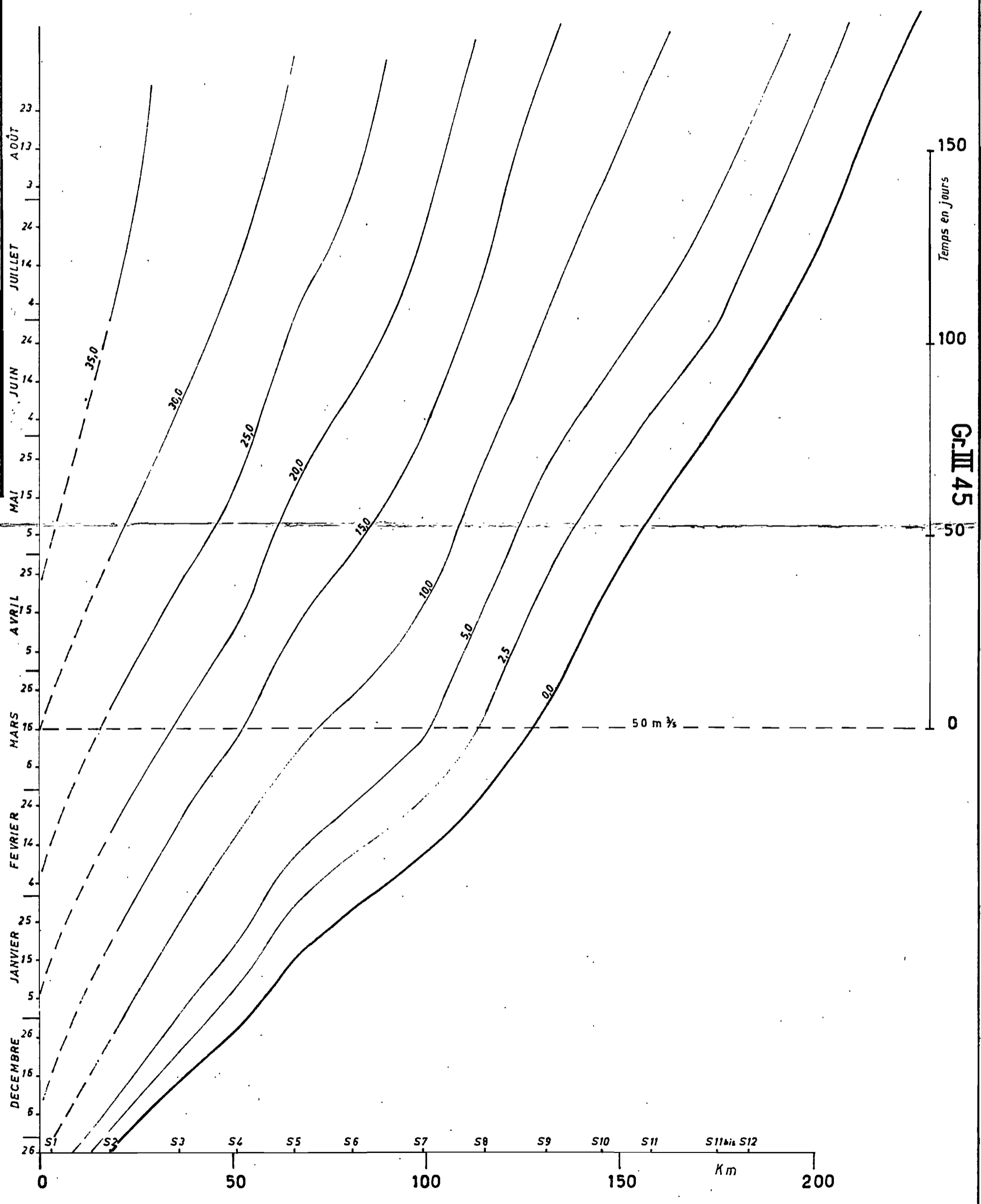


Gr. III 44

ORSTOM  
A0  
DATE 25.3.44  
DESSINE Gallienne  
SEN-41.259

# Diagramme II

## Relation Temps-Salinité moyenne de base ( $Q < 50 \text{ m}^3/\text{s}$ )



Temps en jours  
150  
100  
Gr III 45

50 m³/s

0 50 100 150 200 Km  
S1 S2 S3 S4 S5 S6 S7 S8 S9 S10 S11 S11bis S12

On arrive à la conclusion suivante : à la condition généralement réalisée d'un débit fluvial constamment supérieur au débit juste nécessaire pour provoquer la régression de la salure, l'évolution de la salinité pendant le retrait dépend essentiellement du volume écoulé à partir de la fin de l'étiage, la forme d'évolution du débit n'intervenant pratiquement pas.

A partir des observations effectuées en 1963, on a déterminé la relation liant la régression de la salure comptée à partir de la position maximale atteinte cette année là (188 km de l'embouchure), au volume écoulé.

Cette relation est définie par le tableau ci-dessous :

Position de la salure	Retrait en km	Volume total écoulé ( $10^6 m^3$ )
RICHARD-TOLL	30	95
ROSSO	43	139
DIAOUAR	73	257
DEBI	97	365
GOROM	112	445
SAINT-LOUIS	170	765
GANDIOLE	185	875

Utilisée à la suite des relations précédentes relatives à l'intrusion saline, elle permet de reconstituer, à partir de l'hydrogramme à BAKEL ou en tête du bief maritime, l'évolution cyclique annuelle de la salinité dans le Delta.

III.6. - Etude statistique de l'abscisse maximale atteinte par l'eau salée et du retrait de la salure

Pour ne pas introduire des erreurs trop nombreuses en prenant en compte la totalité des années où la date d'arrivée de la crue est imprécise (période 1903-1948), nous avons limité l'application de la méthode de reconstitution du cycle annuel d'évolution de la salure à la période 1930-1964.

Les résultats sont rassemblés dans les tableaux ci-après dont l'un (tableau n° 3-36) donne la distribution statistique des abscisses maximales annuelles atteintes par l'eau salée, le second (tableau n° 3-37) les dates de retrait en 4 postes du Delta et les probabilités correspondantes.

Tableau n° 3-36

FREQUENCE des ABSCISSES MAXIMALES  
ANNUELLES ATTEINTES par l'EAU SALEE

Fréquence au dépassement F %	Abscisse maximale depuis l'embouchure (km)
5	205
10	201
25	194
50	183
75	169
90	150
95	138

Tableau n° 3-37

DATES de RETRAIT - PROBABILITES au NON DEPASSEMENT

Probabilité	RICHARD-TOLL	DIAOUAR	GOROM	SAINT-LOUIS
05 %	- } (1)	22 Juin	3 Juillet	12 Juillet
10 %		28 Juin	8 Juillet	16 Juillet
25 %	27 Juin	7 Juillet	16 Juillet	22 Juillet
50 %	8 Juillet	16 Juillet	24 Juillet	30 Juillet
75 %	18 Juillet	25 Juillet	1er Août	6 Août
90 %	23 Juillet	29 Juillet	5 Août	11 Août
95 %	26 Juillet	2 Août	8 Août	14 Août

(1) L'eau salée n'atteint pas RICHARD-TOLL.



## C O N C L U S I O N

La mise au point de la présente monographie, a exigé un travail considérable d'analyse critique des données brutes, de dépouillement et d'interprétation.

De 1960 à 1964, trois ingénieurs se sont succédés à SAINT-LOUIS pour examiner l'ensemble des documents rassemblés par les organismes qui avaient étudié jusqu'à cette date l'hydrologie du fleuve. Il s'agit de MM. Pierre TOUCHEBEUF de LUSSIGNY, Pierre GISCARO et Claude ROCHETTE. En même temps, il a été procédé sur le terrain aux mesures complémentaires les plus urgentes.

A partir de la totalité de ces données, on a pu déduire une monographie qui est très complète pour certains points mais qui, pour d'autres, présente de graves lacunes ainsi que cela a été exposé dans l'introduction.

Afin de progresser dans la connaissance des caractéristiques hydrologiques du fleuve, il est absolument indispensable de prévoir l'implantation d'un réseau pluviométrique correct. Il faudrait obtenir une densité de postes pluviométriques, sur le bassin supérieur, au moins double de celle qui a été réalisée au moment où le fonctionnement était optimal. Il serait nécessaire que tous ces postes soient exploités correctement, ce qui suppose qu'ils soient contrôlés assez fréquemment.

Il serait également nécessaire d'augmenter la densité des stations de jaugeages dans la partie amont du bassin en majorant de 50 % le nombre de stations, d'assurer à toutes ces stations un fonctionnement continu et de les étalonner à fond. Cette dernière partie ne présente pas d'obstacle très difficile à surmonter.

La connaissance des transports solides et de la qualité des eaux serait également utile.

Enfin, l'étude des plaines d'inondation et des défluentés a été à peine esquissée dans le présent ouvrage. Beaucoup a été fait dans le passé, dans ce domaine, mais de

façon très incomplète. En général, cette insuffisance d'études n'est pas désastreuse car on possède tout le long du SENEGAL et du DOUE des stations de références qui fournissent une bonne base statistique, de sorte qu'en 3 ou 4 ans d'études, on peut arriver à une bonne connaissance de l'hydrologie de tel ou tel défluent ou plaine d'inondation de la Basse Vallée.

En conclusion, il ne faudrait pas considérer que cette monographie est un aboutissement ; il reste encore beaucoup à faire sur le terrain pour arriver à une connaissance suffisante des données hydrologiques nécessaires aux grands aménagements qui sont prévus sur l'ensemble du bassin du fleuve.