

**COMPLEMENT A L'ETUDE DES TRANSPORTS
SOLIDES EN SUSPENSION AU CAMEROUN**

CAMPAGNE 1969

par

J. F. NOUVELOT

OCTOBRE 1970

OFFICE DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE
OUTRE-MER

SECTION D'HYDROLOGIE

COMPLEMENT A L'ETUDE DES TRANSPORTS
SOLIDES EN SUSPENSION AU CAMEROUN

CAMPAGNE 1969

par

J.F. NOUVELOT

OCTOBRE 1970

CENTRE O.R.S.T.O.M. DE YAOUNDE

La présente note a été rédigée par
J.F. NOUVELOT.

Les travaux sur le terrain et en laboratoire
ont été effectués principalement par Messieurs
G. DELFIEU (Technicien Hydrologue) et J. ANDIGA
(Aide-Technique).

S O M M A I R E

L'étude des transports solides en suspension demandant un très grand nombre de mesures dont la fréquence varie généralement, pour un régime hydrologique donné, à l'inverse de la superficie du bassin étudié, seules deux stations ont été observées en 1968 et 1969, au CAMEROUN. Les mesures effectuées au cours de ces deux campagnes sur la SANAGA à NACHTIGAL (77.000 km²) et la TSANAGA à BOGO (1535 km²) ont permis de donner une première approximation de la dégradation spécifique moyenne, c'est-à-dire l'importance de l'érosion continentale, susceptible d'être observée sur ces deux types de bassins, l'un soumis au climat tropical de transition (CENTRE CAMEROUN), l'autre soumis au climat tropical pur (NORD CAMEROUN). Cette dégradation serait de 28 T/km² x an pour le bassin de la SANAGA et de 210 T/km² x an pour celui de la TSANAGA, ce qui correspond à une turbidité moyenne de 58 g/m³ pour la première et 1200 g/m³ pour la seconde.

Il est certain que ces valeurs ne nous donnent qu'une estimation globale et, par conséquent par défaut, de l'érosion subie localement par les sols, étant donné qu'une partie, parfois importante, des matériaux érodés se **dépose** sous forme de col-luvions dans les bas de pentes, puis, éventuellement, dans les plaines d'inondation. L'étude de ces "mouvements" est hors de notre sujet.

Il n'en reste pas moins vrai que les facteurs condition-nels que nous nous sommes efforcés de dégager, principalement le rôle de l'évolution du sol au cours de la saison des pluies : nettoyage d'abord, puis croissance de la végétation herbacée, ont un caractère tout a fait général.

I N T R O D U C T I O N

La mesure systématique des transports solides en suspension, sur un certain nombre de cours d'eau camerounais s'est poursuivie tout au long de l'année 1969. Toutefois, le programme établi, initialement, en 1966 et 1967, qui prévoyait une étude extensive couvrant l'ensemble du Cameroun a dû être modifié.

La rédaction d'un premier rapport *, faisant le point des mesures effectuées entre 1966 et 1969, nous a, en effet, permis d'analyser, en détail, la méthodologie à suivre pour établir un bilan valable, permettant de chiffrer avec une assez bonne précision la dégradation d'un bassin donné, à l'échelle de l'année, du mois, voir de la journée. Il nous est ainsi, apparu, que la condition primordiale à l'obtention de valeurs suffisamment précises était la multiplication des mesures, principalement dans le temps. Il s'averait donc nécessaire de transformer notre étude extensive, en une étude intensive beaucoup plus limitée dans l'espace.

Des cinq zones d'action initialement retenues, nous n'avons conservé que deux bassins ayant des caractéristiques géologiques, pédologiques, phytogéographiques et hydrologiques très différentes :

- le bassin de la SANAGA à la station de NACHTIGAL (Centre-CAMEROUN) ;
- le bassin du mayo TSANAGA à la station de BOGO (NORD-CAMEROUN).

* MESURE ET ETUDE DES TRANSPORTS SOLIDES EN SUSPENSION AU CAMEROUN - par J.F. NOUVELOT - Avril 1969.

1 - LA SANAGA à NACHTIGAL

1 - 1 Diverses caractéristiques

Les diverses caractéristiques de ce bassin figurent dans le premier rapport dont nous avons déjà fait mention à la page 1. Nous nous contenterons de rappeler qu'il a une superficie de 77.000 km^2 , que son sous-sol est formé principalement de roches métamorphiques et éruptives avec localement des recouvrements volcaniques et sédimentaires, que sa végétation se compose de 30 % de forêt et 70 % de savane, que ses pentes sont modérées et qu'il est soumis au régime tropical de transition caractérisé par une pointe de crue en septembre-octobre et un étiage en février - mars.

1 - 2 Protocole de mesures

Il ne s'agit pas de revenir sur le matériel utilisé, ni sur les diverses manipulations intervenant lors des prélèvements ou des dépouillements. Nous voulons simplement préciser le programme de travail que nous avons imposé à l'agent chargé des mesures :

- Alternativement, chaque semaine, un jaugeage complet - débit solide + débit liquide - et un jaugeage partiel - uniquement des prélèvements de surface.

- Prélèvement journalier d'un échantillon de 10 litres suffisamment dans le courant et toujours dans les mêmes conditions. Ce même type d'échantillon était, également, prélevé au cours de chaque jaugeage.

1 - 3 Liste des jaugeages

Dans le tableau, ci-après :

H est la hauteur d'eau à l'échelle limnimétrique, en cm,

Q est le débit, en m^3/s

Cr est la concentration de l'échantillon témoin, en g/m^3 ,

QS est le débit solide, en Kg/s

Cm est la concentration moyenne, en g/m^3 ($C_m = \frac{QS}{Q}$)

CM est la concentration maximale mesurée, en g/m^3 .

N°	Date	H	Q	Cr	QS	Cm	CM	Observations
1	29 - 1 -69	72	334		2,2	6,5	10,0	
2	5 - 3 -69	66	308		0,74	2,4	8,0	
3	28 - 3 -69	81 ^{1/2}	380		11,9	31,3		partiel
4	8 - 4 -69	69 ^{1/2}	323		6,0	18,7		partiel
5	15 - 4 -69	66	314	4,2	2,1	6,6	9,2	
6	21 - 4 -69	82	383	4,6	2,2	5,8		partiel
7	28 - 4 -69	81	377	6,0	2,5	6,6	9,3	
8	5 - 5 -69	72 ^{1/2}	336	4,5	2,3	6,9		partiel
9	12 - 5 -69	84	396	12,3	5,9	14,8	22,9	
10	20 - 5 -69	144	867	61,3	53,8	62,0		partiel
11	27 - 5 -69	164 ^{1/2}	1059	70,5	75,1	71,0	86,6	
12	2 - 6 -69	136	795	36,3	37,3	46,9		partiel
13	9 - 6 -69	160 ^{1/2}	999	47,3	48,0	48,0	66,0	
14	16 - 6 -69	145	875	57,9	51,3	58,6		partiel
15	23 - 6 -69	133 ^{1/2}	775	56,5	44,1	56,9	63,7	
16	30 - 6 -69	168 ^{1/2}	1100	71,7	85,0	77,3		partiel
17	7 - 7 -69	229	1731	124,1	214,6	124,0	175,1	
18	15 - 7 -69	224	1672	92,8	152,0	90,9		partiel
19	21 - 7 -69	242	1879	92,0	172,1	91,6	111,5	
20	28 - 7 -69	268	2200	87,5	199,3	90,6		partiel
21	4 - 8 -69	287	2444	68,6	(183,5)	(75,1)	100,7	mauvaises mesures de vitesses
22	11 - 8 -69	292	2508	45,7	133,4	53,2		partiel
23	18 - 8 -69	273	2264	40,6	108,7	48,0	60,9	
24	25 - 8 -69	338	3150	63,8	179,6	57,0		partiel
25	17 -11 -69	229	1731	36,9	65,1	37,6		partiel
26	24 -11 -69	172	1031	19,9	21,6	21,0	40,2	
27	9 -12 -69	133	769	16,1	15,1	20,9	23,8	

Il a été effectué 14 jaugeages complets dont 8 ont pu être dépouillés par la méthode dite des "paraboles". Ces derniers se situent principalement entre Mai et Août, période la plus intéressante pour l'étude des transports solides ; d'autant qu'en pleine saison des pluies le régime de la SANAGA a été quelque peu perturbé par la fermeture, plus ou moins complète, du barrage de **MBAKAOU**.

A ces 14 mesures s'ajoutent 13 jaugeages partiels au cours desquels nous avons prélevé, uniquement, des échantillons de surface en plongeant directement les jerricans de 10 litres dans la rivière. La répartition des points de mesures dans la section était la même que pour les jaugeages complets.

1 - 4 Présentation des résultats

1 - 4 - 1 Jaugeages complets

Pour chaque jaugeage complet nous avons mesuré :

- la cote du plan d'eau, H
- le débit, Q
- le débit, solide, QS
- la concentration moyenne, $C_m = \frac{QS}{Q}$
- La concentration moyenne dite "arithmétique", obtenue en faisant la moyenne arithmétique des concentrations :

$$C_A = \frac{C_1 + C_2 \dots \dots \dots + C_n}{n}$$

- la concentration moyenne dite "partielle" obtenue en faisant la moyenne arithmétique des concentrations de surface :

$$C_p = \frac{C_{s1} + C_{s2} \dots \dots \dots + C_{sm}}{m}$$

- la concentration d'un échantillon témoin, Cr.

1 - 4 - 2 Jaugeages partiels

Au cours de ces jaugeages, seules étaient mesurées :

- la cote du plan d'eau, H
- la concentration moyenne, Cp
- la concentration de l'échantillon témoin, Cr

Le débit était obtenu à partir de la courbe de tarage $Q = \psi(H)$ et le débit solide Q_s , en faisant le produit $Q \times C_p$.

1 - 4 - 3 Prélèvements journaliers

Un observateur prélevait chaque matin, en même temps qu'il notait la cote du plan d'eau, un échantillon de 10 litres dans les mêmes conditions que l'échantillon témoin pris au cours des différents jaugeages.

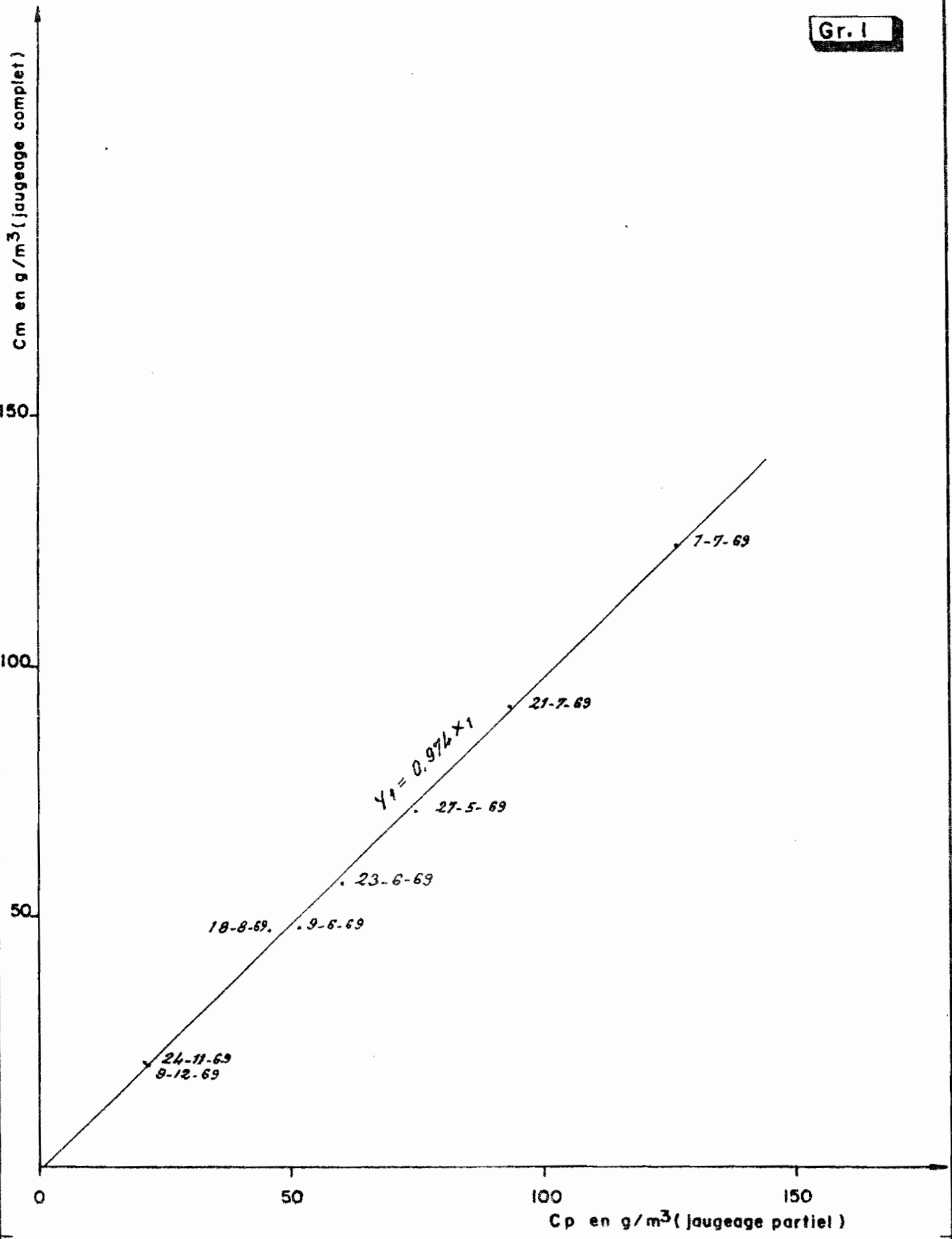
1 - 5 Interprétation des résultats

Dans la masse des mesures effectuées, seuls les jaugeages complets sont susceptibles de fournir une valeur relativement exacte de la concentration moyenne. Les prélèvements journaliers ou les jaugeages partiels ne présentent un intérêt que dans la mesure où ils permettent de calculer avec une bonne approximation la turbidité moyenne réelle.

Nous avons donc cherché s'il existait entre ces différentes valeurs de la turbidité et la concentration moyenne, des liaisons rigides ou simplement stochastiques qui permettent de fournir une estimation valable du débit solide.

1 - 5 - 1 Liaison entre un jaugeage complet et un jaugeage partiel.

Le graphique 1 montre qu'il existe une liaison rigide remarquable (coefficient de corrélation $r = 1$) entre la concentration moyenne C_m et la concentration moyenne dite "partielle", C_p .



SANAGA à NACHTIGAL 1969
Correlation: jaugeage complet - jaugeage partiel

La droite d'estimation R_1 passe par le point :

$$\begin{aligned}\overline{C_p} &= 82,2 \text{ g/m}^3 \\ \overline{C_m} &= 80,2 \text{ g/m}^3\end{aligned}$$

Elle a pour coefficient angulaire :

$$a_1 = 0,974$$

Son équation est :

$$Y_1 = 0,974 X_1$$

R_1 fournit donc une estimation C'_m de C_m lorsque C_p est connue.

Il peut, à priori, paraître aberrant que les mesures de surface donnent une concentration légèrement supérieure à la concentration moyenne. Il nous faut, toutefois préciser que dans ce cas particulier, la section de mesure se trouve à l'aval d'une série de rapides et que, de plus, le mode de prélèvement est différent dans les deux cas. Un autre phénomène dont l'influence est moindre, mais qui mérite d'être signalé est l'importance des vitesses de surface par rapport à la vitesse moyenne.

1 - 5 - 2 Liaison entre un jaugeage complet et un échantillon témoin.

Le graphique 2 montre qu'il existe comme dans le cas précédent une liaison rigide ($r \approx 1$) entre la concentration moyenne C_m , et la concentration C_r d'un échantillon témoin.

La droite de régression R_2 passe par le point :

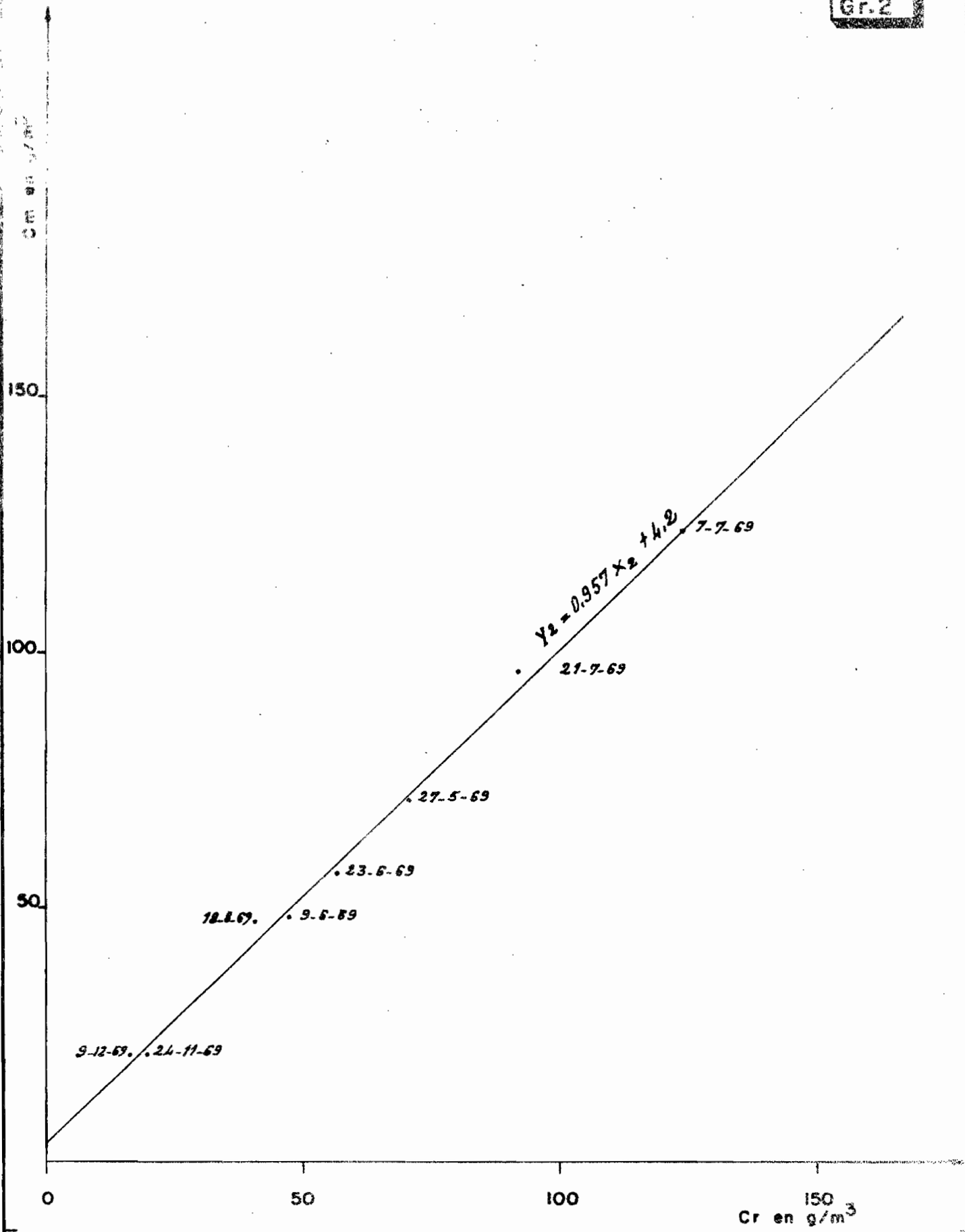
$$\begin{aligned}\overline{C_r} &= 58,4 \text{ g/m}^3 \\ \overline{C_m} &= 60,1 \text{ g/m}^3\end{aligned}$$

son coefficient angulaire, $a_1 = 0,957$

Elle a pour équation :

$$Y_2 = 0,957 X_2 + 4,2$$

Afin de disposer d'un échantillon de mesures plus important nous avons corrigé 23 jaugeages partiels à l'aide de la relation établie au paragraphe 1 - 5 - 1, et nous avons



SANAGA à NACHTIGAL 1969
Correlation entre la concentration moyenne
et la concentration d'un échantillon témoin

cherché quel type de liaison existait entre une telle mesure, qui peut, en faite, être assimilée à un jaugeage complet, et un échantillon témoin.

Comme dans les deux cas précédents nous avons utilisé la méthode des moindres carrés, qui permet de conclure qu'il existe une liaison rigide entre ces deux types de mesures puisque le coefficient de corrélation, r , a été trouvé égal à 0,99.

La droite d'estimation R_3 de C_m (concentration moyenne) en C_r (échantillon témoin) a pour équation :

$$Y_3 = 0,961 X_3 + 2,6.$$

Elle passe par le point :

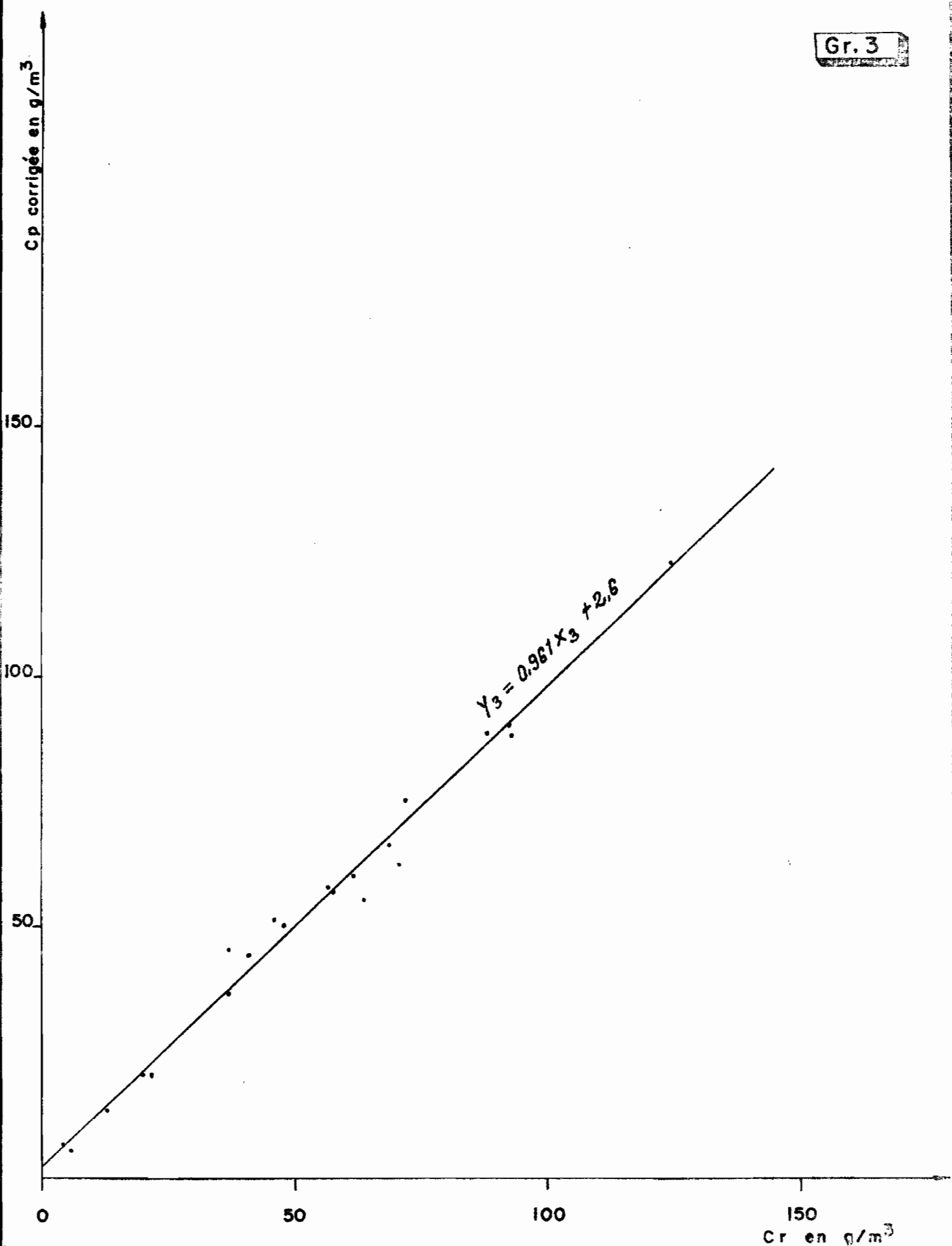
$$\begin{aligned} \overline{C_r} &= 49,0 \text{ g/m}^3 \\ \overline{C_m} &= 49,7 \text{ g/m}^3 \quad (\text{graphique 3}) \end{aligned}$$

Bien que les deux échantillons de mesures soient différents, nous pouvons constater que les deux droites de régression R_2 et R_3 ont des équations très voisines et que, par conséquent, la mesure de la concentration d'un échantillon de 10 litres permet d'avoir une bonne estimation de la concentration moyenne.

Remarque : Il semblerait que pour de fortes concentrations, supérieures à 98 g/m^3 si on se réfère à R_2 et supérieures à 67 g/m^3 d'après R_3 , C_p soit supérieure à la concentration moyenne C_m . Pour les mêmes raisons que nous avons déjà exposées au paragraphe 1 - 5 - 1 ce phénomène ne nous paraît pas impossible ; d'autant que, dans ce cas, il est vraisemblable que l'érosion locale des berges majore quelque peu la turbidité de l'échantillon témoin.

1 - 5 - 3 Etude des jaugeages complets

Il est possible que faute de temps (de telles mesures sont souvent très longues), ou dans le cas où les variations de cote ne peuvent pas être tenues pour négligeables, l'opérateur ne puisse pas, à la fois, mesurer les vitesses du courant et faire des prélèvements. On se contente, alors, de prendre pour concentration moyenne, la moyenne arithmétique des concentra-



SANAGA à NACHTIGAL 1969
Correlation entre la concentration moyenne
et la concentration d'un échantillon témoin

tions. Cette méthode, ne donne des résultats valables que dans la mesure où les prélèvements sont fait toujours sur les mêmes verticales. Il nous faut, en effet, préciser que, malgré un marnage supérieur à 4 mètres la largeur "utile" de la section de NACHTIGAL est relativement stable.

Sur la graphique 4 figure la droite de régression R4, qui permet d'estimer la concentration moyenne à partir de la moyenne arithmétique de "n" concentrations, "n" étant toujours supérieur à 23.

La liaison entre ces deux couples de mesures est rigide ($r \approx 1$) et R4 a pour équation : $Y_4 = 0,954 X_4$

La moyenne arithmétique des concentrations donne donc une estimation par excès de la concentration moyenne réelle.

1 - 6 Variations saisonnières des transports solides

1 - 6 - 1 Variation de la concentration moyenne

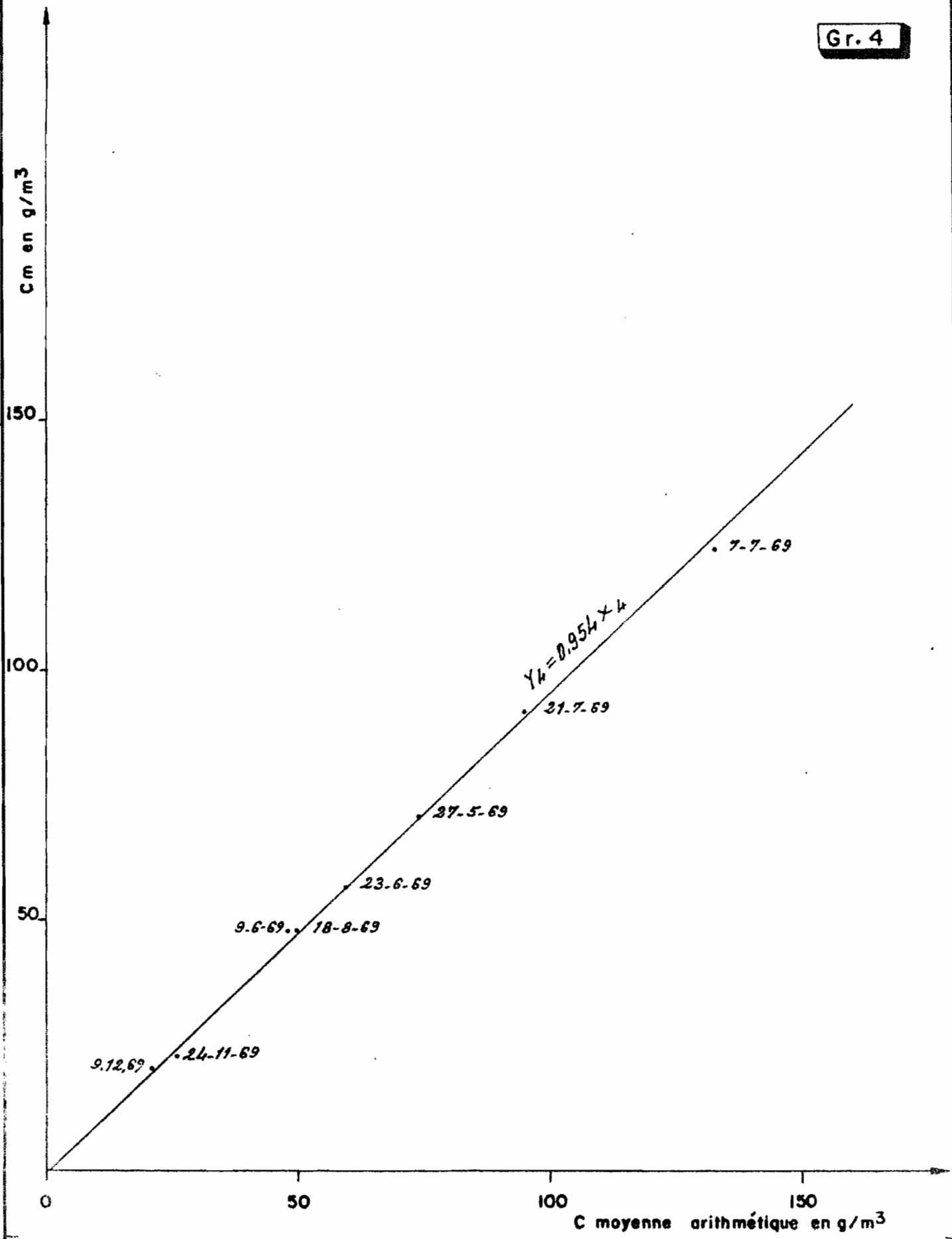
Le graphique 5 donne les variations saisonnières de la concentration moyenne journalière et du débit moyen journalier.

Les deux courbes de régime ont été, quelque peu, perturbées par la construction, puis la fermeture plus ou moins complète du barrage de MBAKAOU.

Nous pouvons, tout de même, dégager qualitativement certains caractères propres aux grands bassins soumis au régime tropical de transition :

-1- En début de saison des pluies, de Mars - Avril à Juillet la turbidité augmente très forment en fonction du débit.

Les premières pluies, suffisamment importantes, pour ruisseler, "nettoient" littéralement la surface du sol, qui, en pays de savanes, reste pratiquement sans aucune protection végétale durant toute la saison sèche.

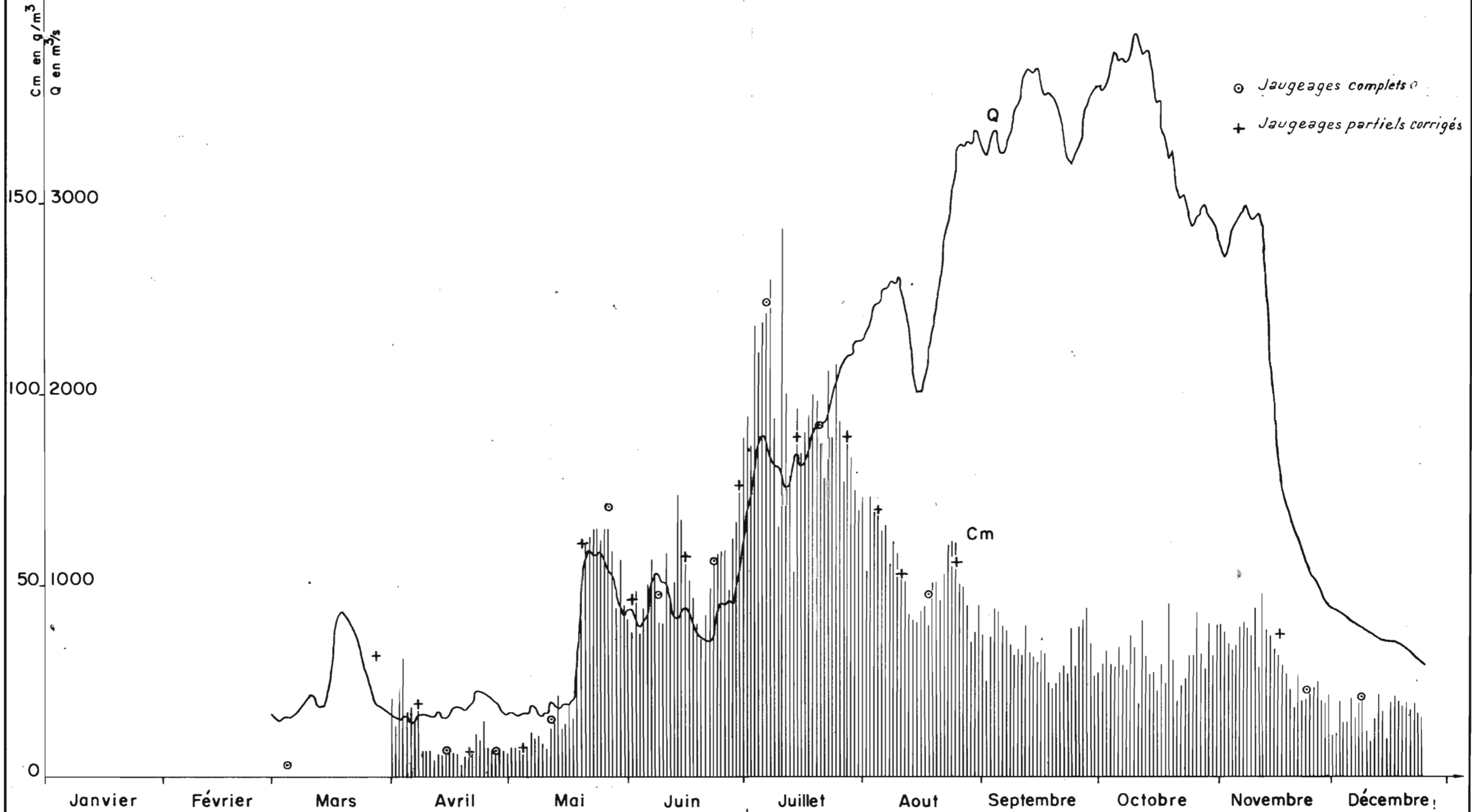


SANAGA à NACHTIGAL 1969
Correlation entre la concentration moyenne
et la moyenne arithmétique des concentrations

Gr. 5

SANAGA à NACHTIGAL 1969

Débits moyens journaliers - Concentrations moyennes journalières



Les concentrations maximales, supérieures à 100 g/m^3 , sont observées en Juillet alors que les débits sont inférieurs à la moitié des débits maximaux.

-2- En pleine saison des pluies, de juillet à la mi-octobre, les débits augmentent sensiblement alors que la concentration décroît ; d'abord très rapidement le premier mois, puis beaucoup plus lentement les mois suivants. Il s'agit, là, évidemment, de tendances générales, observées à l'échelle du mois, qui font abstraction des fluctuations journalières.

Entre la fin Août et la mi-octobre, période des plus hautes eaux, la turbidité reste relativement stable. Elle se situe entre 20 et 40 g/m^3 .

La végétation est maintenant suffisamment importante pour intercepter efficacement les gouttes de pluies dont l'action mécanique sur le sol se trouve ainsi très réduite.

-3- En fin de saison des pluies lorsque la décrue est amorcée la turbidité décroît plus rapidement.

-4- En saison sèche lorsque les pluies ont complètement cessé, la décroissance devient très rapide, les matériaux transportés provenant uniquement de l'érosion se situant dans le réseau hydrographique principal.

Pour cette quatrième période nous nous sommes référés aux mesures faites fin 1968 - début 1969, l'étude des transports solides ayant été abandonnée en décembre 1969, les premières lâchures devant être effectuées à MBAKAOU à la mi-Janvier 1970.

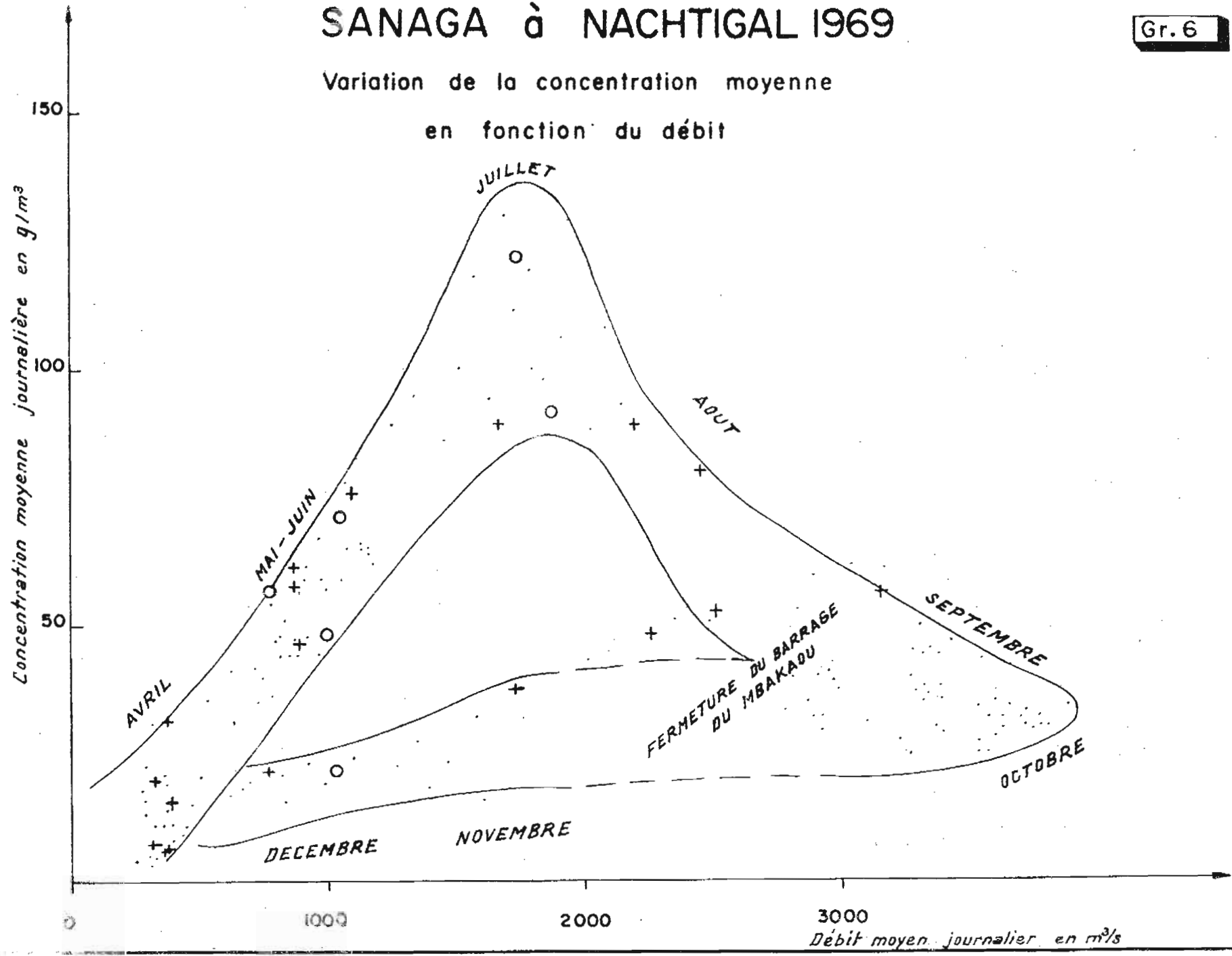
Le graphique 6 montre les variations de la concentration moyenne journalière en fonction du débit moyen journalier.

Le nuage de points se répartit suivant une large boucle ayant grossièrement la forme d'un triangle dont les sommets auraient pour coordonnées, respectivement :

SANAGA à NACHTIGAL 1969

Gr. 6

Variation de la concentration moyenne
en fonction du débit



- concentration minimum - débit minimum,
- concentration maximum - débit Q,
- concentration C - débit maximum.

1 - 6 - 2 Variation des débits solides

Nous avons porté sur le graphique 7 les variations du débit solide moyen journalier ($C_m \times Q$) en fonction du temps :

Les plus forts transports solides s'observent en début de saison des pluies malgré des débits relativement faibles.

En pleine saison des pluies le facteur C_m l'emporte sur le facteur Q puisque durant cette période le débit solide tend à décroître, alors que Q augmente. Ce phénomène s'accroît, évidemment, en fin de saison des pluies et en saison sèche lorsque les deux facteurs C_m et Q décroissent simultanément.

1 - 7 Bilan

L'hypothèse de base, pour la détermination du poids des matériaux transportés en suspension, est que la concentration corrigée de l'échantillon témoin journalier est sensiblement égale à la concentration moyenne journalière.

Ceci suppose que les variations du plan d'eau, et par la même du débit, sont suffisamment faibles au cours de la journée pour être négligées.

Le poids de matières solides transportées en 24 heures est donc donné par la relation :

$$P_s = 86.400 \times C_m \times Q_L$$

avec $Q_L = \psi (H)$ (H : cote du plan d'eau)

et $C_m = f (C_r)$ (C_r : concentration de l'échantillon témoin)

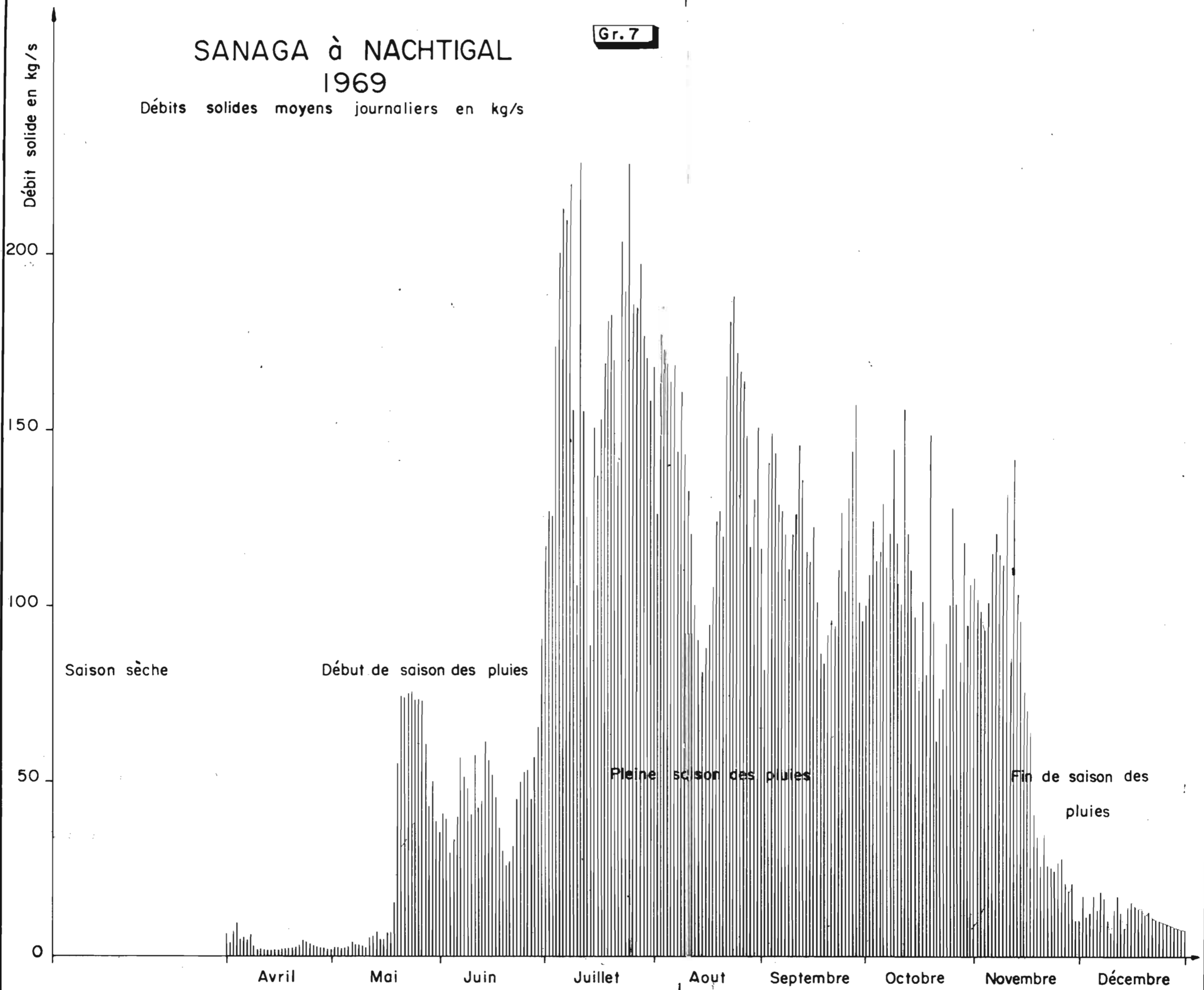
ψ est la courbe de tarage de la station

f a été déterminée au paragraphe 1 - 5 - 2.

SANAGA à NACHTIGAL 1969

Gr. 7

Débits solides moyens journaliers en kg/s



Le bilan, sur une période donnée, peut être calculé, soit en faisant la somme des poids journaliers, soit en planimétrant la surface délimitée par la courbe de variation du débit solide en fonction du temps sur la période considérée et les axes de coordonnées QS et T. Ceci revient à calculer l'intégrale :

$$P = \int_{t1}^{T2} QS \quad dt$$

Le bilan annuel 1969 se répartit mensuellement de la manière suivante :

Janvier	: (12.000 Tonnes)	soit	(387 Tonnes/jour)
Février	: (2.300 Tonnes)	"	(82 Tonnes/jour)
Mars	(40.000 Tonnes)	"	(1.290 Tonnes/jour)
Avril	8.700 Tonnes)	"	290 Tonnes/jour
Mai	73.700 Tonnes	"	2.377 Tonnes/jour
Juin	117.700 Tonnes	"	3.923 Tonnes/jour
Juillet	447.400 Tonnes	"	14.432 Tonnes/jour
Août	375.400 Tonnes	"	12.110 Tonnes/jour
Septembre	300.000 Tonnes	"	10.000 Tonnes/jour
Octobre	279.500 Tonnes	"	9.016 Tonnes/jour
Novembre	179.700 Tonnes	"	5.990 Tonnes/jour
Décembre	31.300 Tonnes	"	1.010 Tonnes/jour

total : 1.867.700 Tonnes soit 5.117 Tonnes/ jour.

Le module ayant été de 1.429 m³/s, soit un volume annuel de 45.065 X 10⁶ m³, la concentration moyenne annuelle est égale à 42 g/m³.

La dégradation spécifique a donc été de 24 Tonnes/Km² X an, soit en admettant une densité moyenne de 1,3 pour l'horizon du sol soumis à l'érosion, une lame de sol équivalente de 2/100 de millimètre environ. Mais, étant donné qu'une

partie très importante des matériaux érodés se dépose d'abord sur les bas de pente (colluvions), puis dans les plaines d'inondation, cette estimation est très inférieure à la réalité.

1 - 8 Conclusion

Le module de l'année 1969 est le plus fort observé en 19 ans d'observations, malgré la mise en eaux du barrage de MBAKAOU qui le 1er Janvier 1970 retenait déjà 1 milliard 800 millions de m³ d'eau. Par contre, le poids annuel des matières solides transportées en suspension est inférieur à celui mesuré au cours de l'année hydrologique 1968 - 1969 - 1.867.700 tonnes contre 2.330.000 tonnes - dont l'hydraulicité était légèrement inférieure à la moyenne.

Nous pouvons trouver plusieurs explications à ce phénomène. Tout d'abord la construction du barrage de MBAKAOU, puis sa mise en eaux ont favorisé le dépôt d'une partie des matériaux provenant du bassin du DJEREM. Or, ces matériaux représentent, en année moyenne, plus de la moitié des transports solides drainés par la SANAGA et transitant par la station de NACHTIGAL. On peut donc raisonnablement supputer qu'en l'absence de ce barrage le bilan annuel des transports solides aurait été largement supérieur à 2 millions de tonnes.

D'autre part le bilan de l'année hydrologique 1968 - 69 a été établi à partir de quelques mesures seulement, les extrapolations ne peuvent donner qu'une estimation de la concentration moyenne. Il est par conséquent possible que ce bilan ait été légèrement surestimé.

Enfin les relations entre débits liquides et débits solides n'étant pas simples, il n'y a rien d'étonnant à ce que le classement des années à partir des volumes d'eau annuels soit différent du classement à partir du poids annuel des matières solides transportées.

Il pourra être intéressant de reprendre ultérieurement cette étude afin de chiffrer le déficit de transports solides dû à MBAKAOU.

La dégradation spécifique moyenne annuelle de la SANAGA, non régularisée, à la station de NACHTIGAL doit se situer aux environs de 28 Tonnes/Km²/an. Ce qui pour un module de 1.180 m³/s correspond à une turbidité moyenne de 58 g/m³ et une lame équivalente de sol érodée légèrement supérieure à 2×10^{-2} mm.

-2 - La TSANAGA à BOGO

2 - 1 Quelques caractéristiques

Les caractéristiques essentielles pour notre étude
peuvent se résumer ainsi :

- Superficie du bassin versant : 1.535 km²
- Fortes pentes longitudinales jusqu'à MAROUA,
relief presque inexistant entre MAROUA et BOGO
- Unités géologiques :
 - massifs et inselbergs formés de roches cristallines ;
 - formations de piemont constituées de roches détritiques ;
 - massifs de roches vertes.
- Sols très diversifiés souvent mal protégés contre l'érosion
- Végétation : savane arborée sur l'ensemble du bassin, couverture assez maigre.
- Régimes climatologique et hydrologique :

Soumis au climat tropical caractérisé par l'alternance d'une saison absolument sèche de Novembre à Mars et d'une saison des pluies de Juin à Septembre, avec averses à fortes intensités, le bassin de la TSANAGA se situe entre les isohyètes 800 et 950 mm.

2 - 2 Protocole de mesures

84 mesures complètes ont été effectuées entre le 18 Juin et le 6 Octobre 1969, soit près de 720 prélèvements.

Pour chaque jaugeage nous avons admis que la moyenne arithmétique des concentrations donnait une estimation suffisamment précise de la concentration moyenne :

$$C_m = \frac{C_1 + C_2 + \dots + C_n}{n}$$

Nous nous sommes efforcés d'effectuer pour chaque crue, un minimum de trois séries de mesures : une à la montée,

une autre au maximum et une à la décrue. Entre les crues les prélèvements étaient plus espacés.

Malgré le nombre important de mesures nous avons été contraints, pour effectuer certaines interpolations ou extrapolations, de tracer un réseau de courbes en boucles, $Q = f(C)$.

2 - 3 Résultats obtenus

Il serait fastidieux de donner la liste complète des différentes mesures. Nous avons simplement, regroupé dans le tableau, ci-dessous, les caractéristiques des principales crues.

Les différentes colonnes de ce tableau indiquent, dans l'ordre :

- N° : numéro de la crue
- Date : date de la crue
- V_r : Volume ruisselé, en 10^3 m^3
- P_s : Poids des matériaux transportés en suspension, en tonne
- $C_m R$: concentration moyenne de ruissellement, en g/l ($C_m R = \frac{P_s}{V_r}$). Nous disons bien en gramme par litre.
- $Q_{\max R}$: Débit maximum de ruissellement, en m^3/s
- $K = \frac{Q_{\max R}}{Q_{\text{moy R}}}$) $Q_{\text{moy R}}$ étant le débit moyen de ruissellement.

(Ce coefficient permet de définir la forme de l'hydrogramme).

N°	Date	$10^3 V_r \text{ m}^3$	$C_m \text{ g/l}$	R	Q max m ³ /s	R	K = $\frac{Q \text{ max } R}{Q \text{ moy } R}$
1	20-21-6	1.530	4.970	3,2	26,5		2,7
2	23-6	2.830	11.560	4,1	45,5		3,3
3	6- 7-7	2.665	5.790	2,2	24,2		1,6
4	14-15-7	3.310	12.580	3,8	60,0		3,8
5	22-23-7	3.160	11.010	3,5	43,8		2,5
6	24-27-7	9.245	23.090	2,5	65,9		3,1
7	31- 7-3-8	12.330	27.550	2,2	111		2,1
8	3- 4-8	14.760	36.280	2,5	184		2,3
9	5- 6-8	5.400	13.680	2,5	103		2,0
10	6- 7-8	6.900	17.410	2,5	84		1,9
11	16-17-8	9.935	20.170	2,0	133		2,6
12	23-24-8	4.230	5.300	1,3	69,0		2,1
13	26-27-8	24.700	41.380	1,7	177		2,1
14	4- 5-9	10.325	15.430	1,5	85		1,8
15	14-15-9	3.445	3.520	1,0	35,0		2,3
16	19-20-9	5.015	8.470	1,7	67,7		3,4
17	26- 9	3.995	5.950	1,5	46,5		2,5

2 - 4 Interprétation des résultats

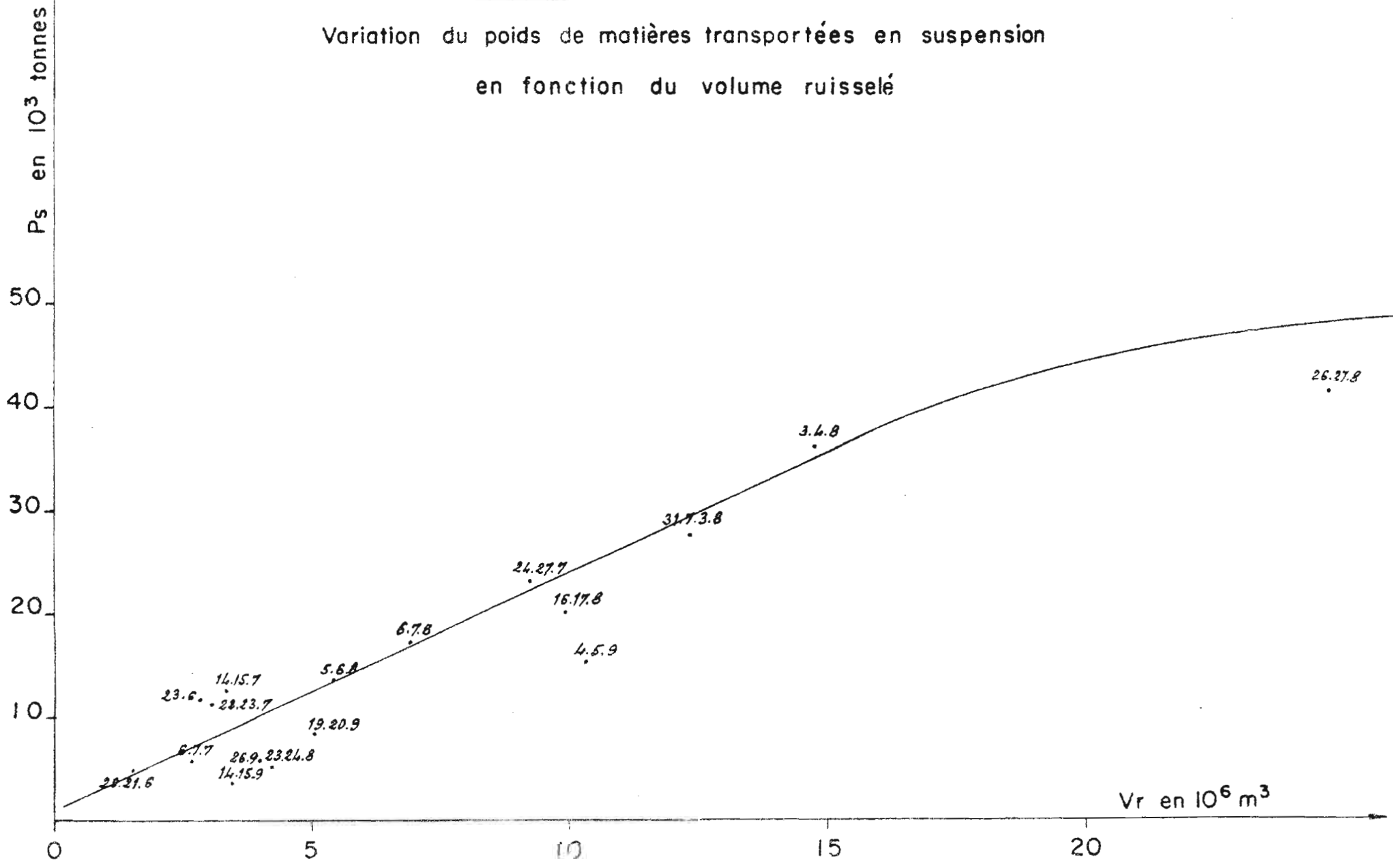
La méthode de travail utilisée est une méthode d'écartés résiduels.

Pour les 17 crues étudiées nous avons porté les poids de matières transportées en suspension (P_S), en fonction des volumes ruisselés (V_r) - graphique 8 - et tracé une courbe moyenne des poids observés. La dispersion étant relativement importante, nous avons étudié graphiquement les écarts des P_S à la courbe du graphique 8 suivant le temps - graphique 9. Cette correction correspond à l'évolution du sol au cours de la saison des pluies: nettoyage d'abord, puis croissance de la végétation herbacée.

Les poids observés corrigés sont portés sur le graphique 10. La courbe moyenne correspond aux P_S observés ramenés au 3 Août.

TSANAGA à BOGO

Variation du poids de matières transportées en suspension
en fonction du volume ruisselé



TSANAGA à BOGO

Cl; Correction temps

ΔP_s
en 10^3 tonnes

+10
+5
0
-5
-10

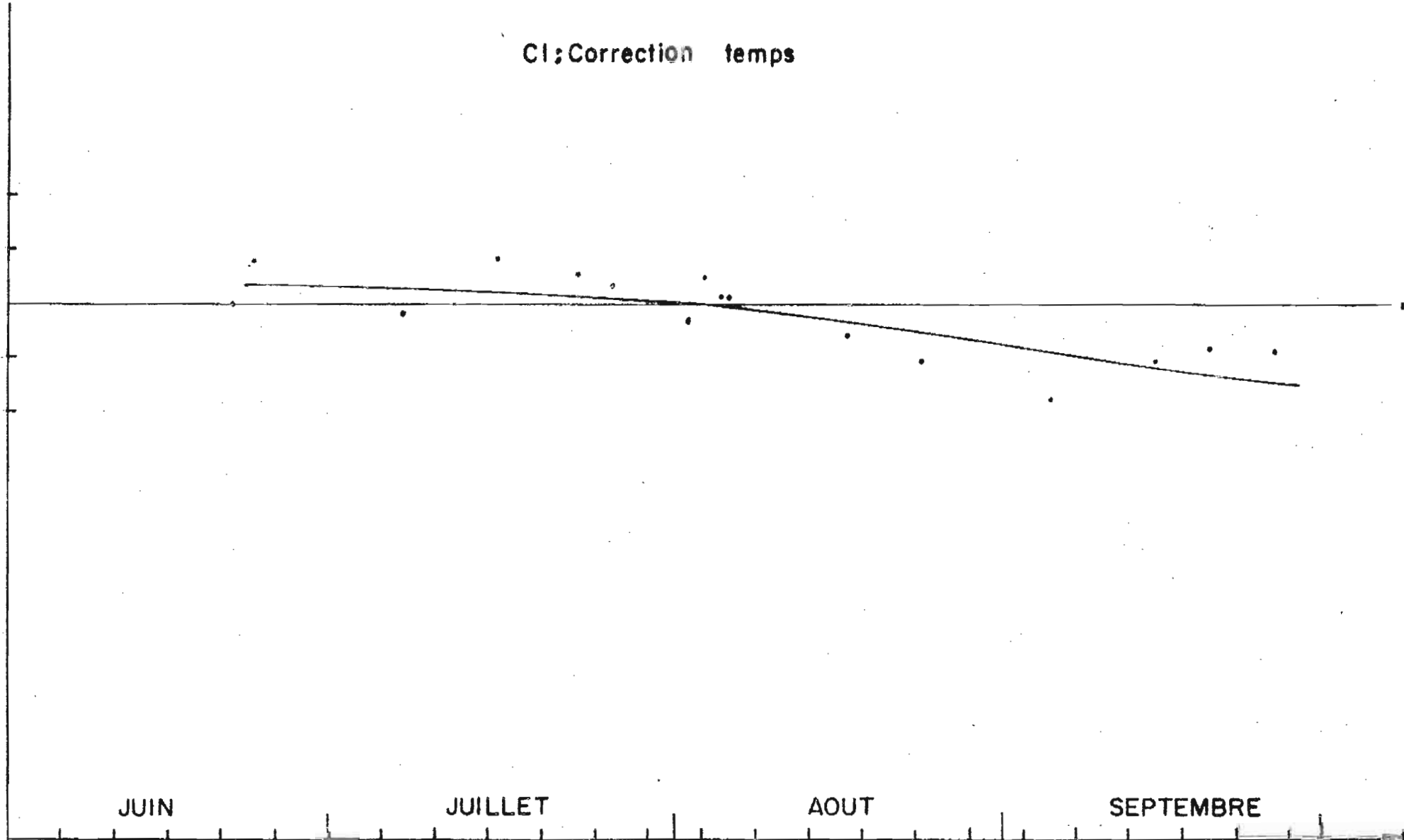
JUIN

JUILLET

AOUT

SEPTEMBRE

5 10 15 20 25 30 4 9 14 19 24 29 3 8 13 18 23 28 2 7 12 17 22 27

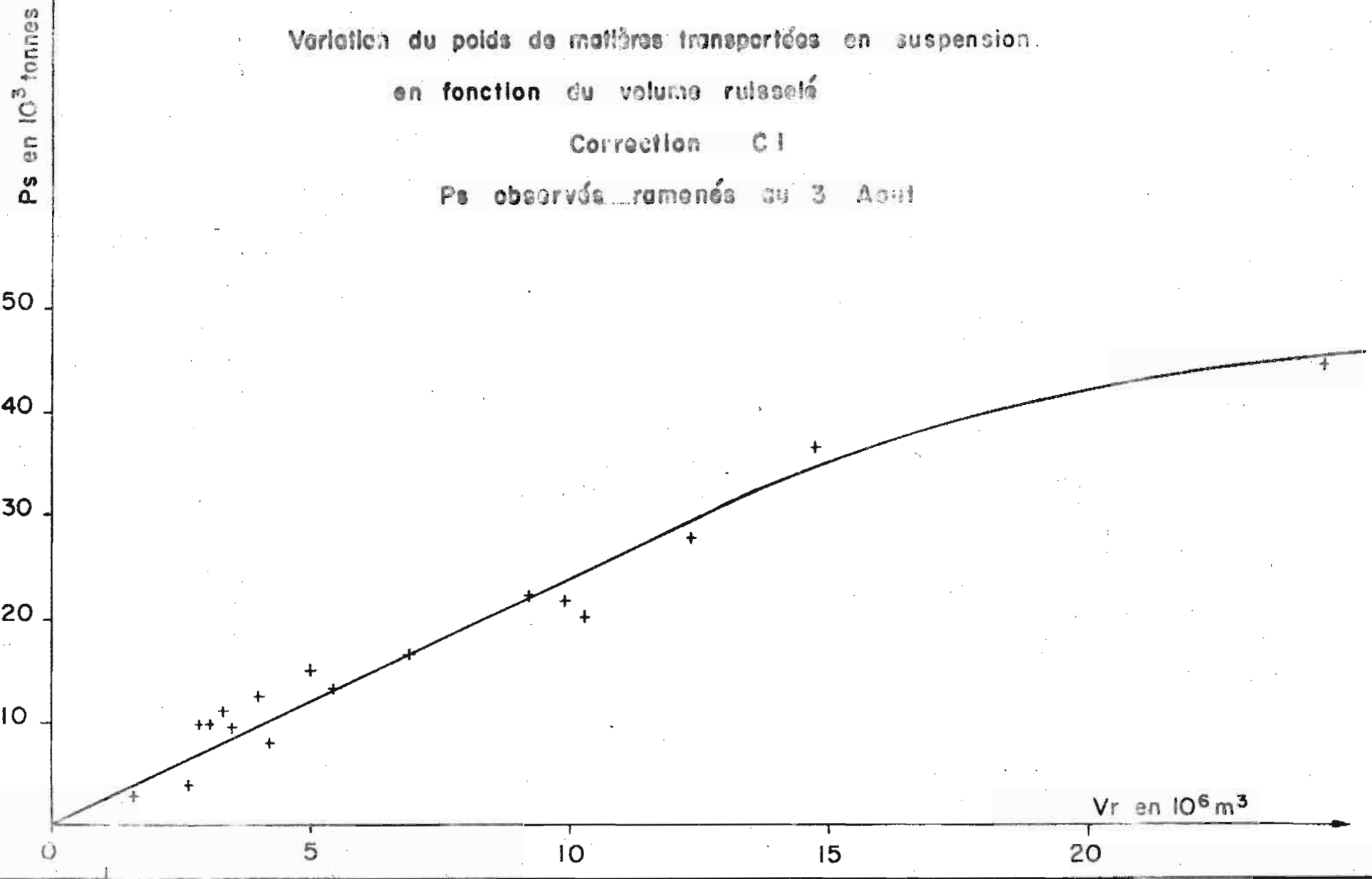


TSANAGA à BOGO

Variation du poids de matières transportées en suspension
en fonction du volume ruisselé

Correction C1

Ps observés ramenés au 3 Août



O.R.S.T.O.M. Service Hydrologique

date

des

Les écarts restant importants nous avons introduit une deuxième correction faisant intervenir la forme de l'hydrogramme, par l'intermédiaire du rapport $K = \frac{Q_{\max} R}{Q_{\text{moy}} R}$, graphique 11. On peut, en effet, raisonnablement supposer qu'à volume égal, et pour des averses suffisamment homogènes, la crue ayant le plus fort pouvoir érosif sera celle qui aura le rapport K le plus élevé (crues provoquées par des averses présentant de fortes intensités).

Les P_s observés corrigés suivant le temps et le coefficient K sont portés, sur le graphique 12, en fonction du volume ruisselé. La dispersion est très acceptable.

Une autre manière d'aborder l'étude des transports solides en période de crues consiste à suivre les variations de la concentration moyenne de ruissellement en fonction du temps - graphique 13.

Comme dans le cas précédent nous avons introduit la correction correspondant à $K = \frac{Q_{\max} R}{Q_{\text{moy}} R}$ - graphique 14.

Le graphique 15 montre les variations des concentrations moyennes corrigées, pour $K = 2,2$, en fonction du temps.

Nous pouvons dégager trois périodes :

- De la mi - juin à la mi - juillet le couvert végétal n'est pas suffisamment important pour protéger efficacement le sol. Les eaux de ruissellement sont très chargées, les concentrations moyennes étant supérieures à 3 g/l.

- De la mi - juillet à la mi - août, quand la végétation essentiellement herbacée, commence à prendre une certaine importance sur l'ensemble du bassin, la concentration moyenne décroît assez rapidement, de 3 g/l à moins de 2 g/l.

- Dès la deuxième quinzaine d'août les variations sont beaucoup moins sensibles la protection végétale étant alors suffisante. La concentration moyenne se situe entre 1,5 g/l et 1 g/l.

TSANAGA à BOGO

C2: Correction K

ΔP_s
10³tonnes

+10
+5
0
-5
-10

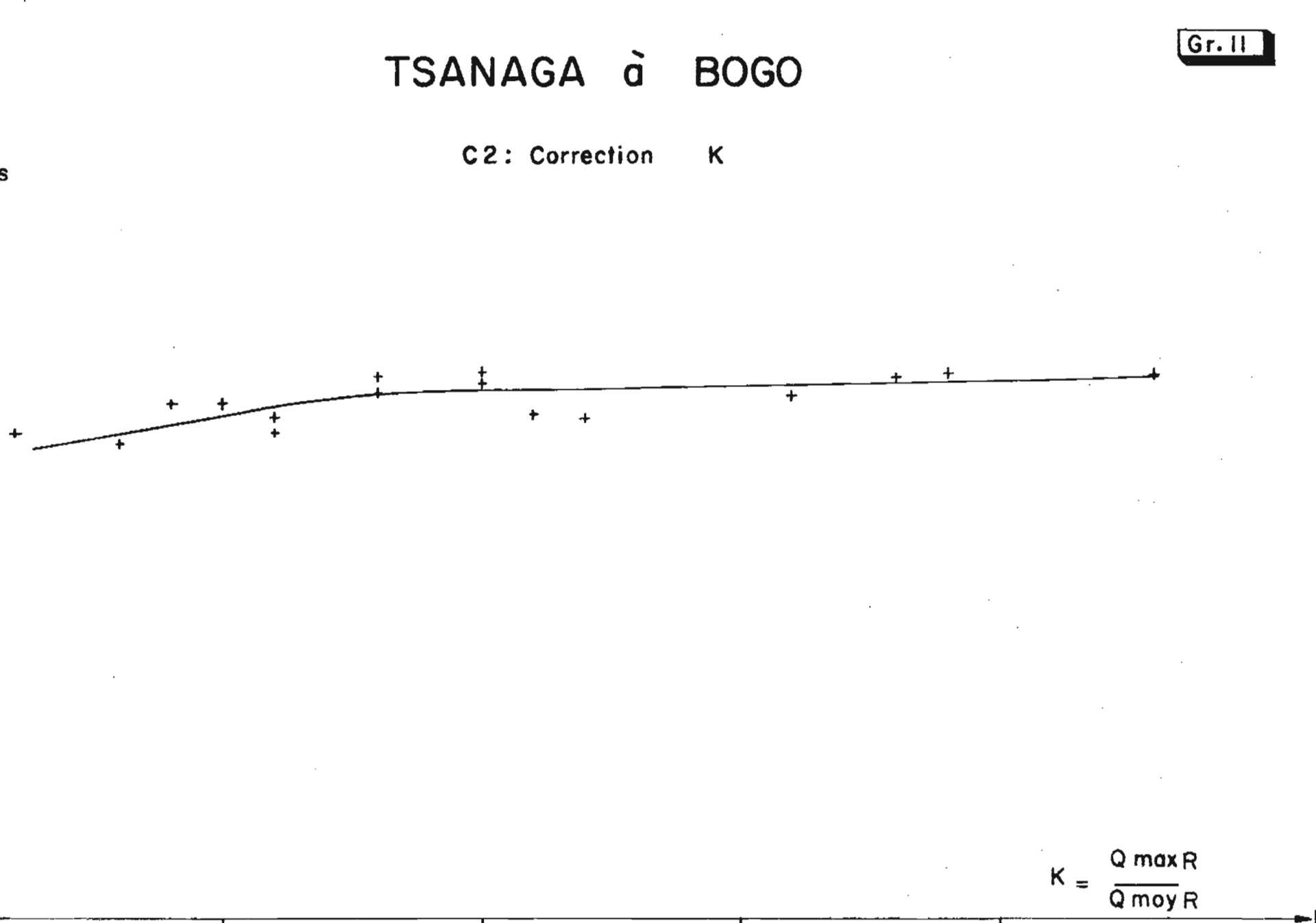
2,0

2,5

3,0

3,5

$$K = \frac{Q_{\max R}}{Q_{\text{moy} R}}$$

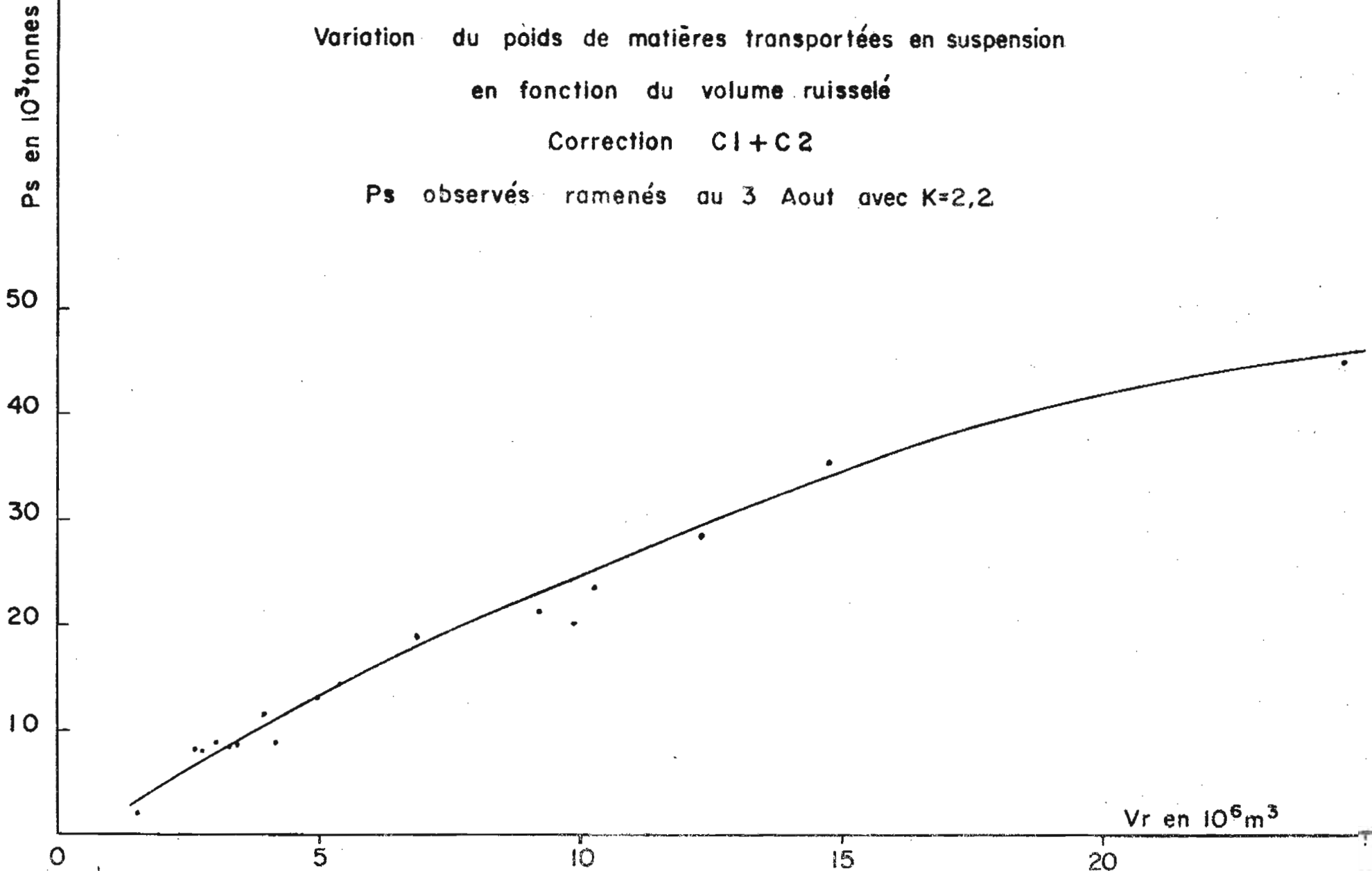


TSANAGA à BOGO

Variation du poids de matières transportées en suspension
en fonction du volume ruisselé

Correction C1 + C2

Ps observés ramenés au 3 Aout avec K=2,2



O.R.S.T.O.M. Service Hydrologique

date

des.

TSANAGA à BOGO

Variation de la concentration moyenne
en fonction du temps

Cm R en g/l

4
3
2
1

JUIN

JUILLET

AOÛT

SEPTEMBRE

5 10 15 20 25 30 4 9 14 19 24 29 3 8 13 18 23 28 2 7 12 17 22 27

O.R.S.T.O.M. Service Hydrologique

date

des.

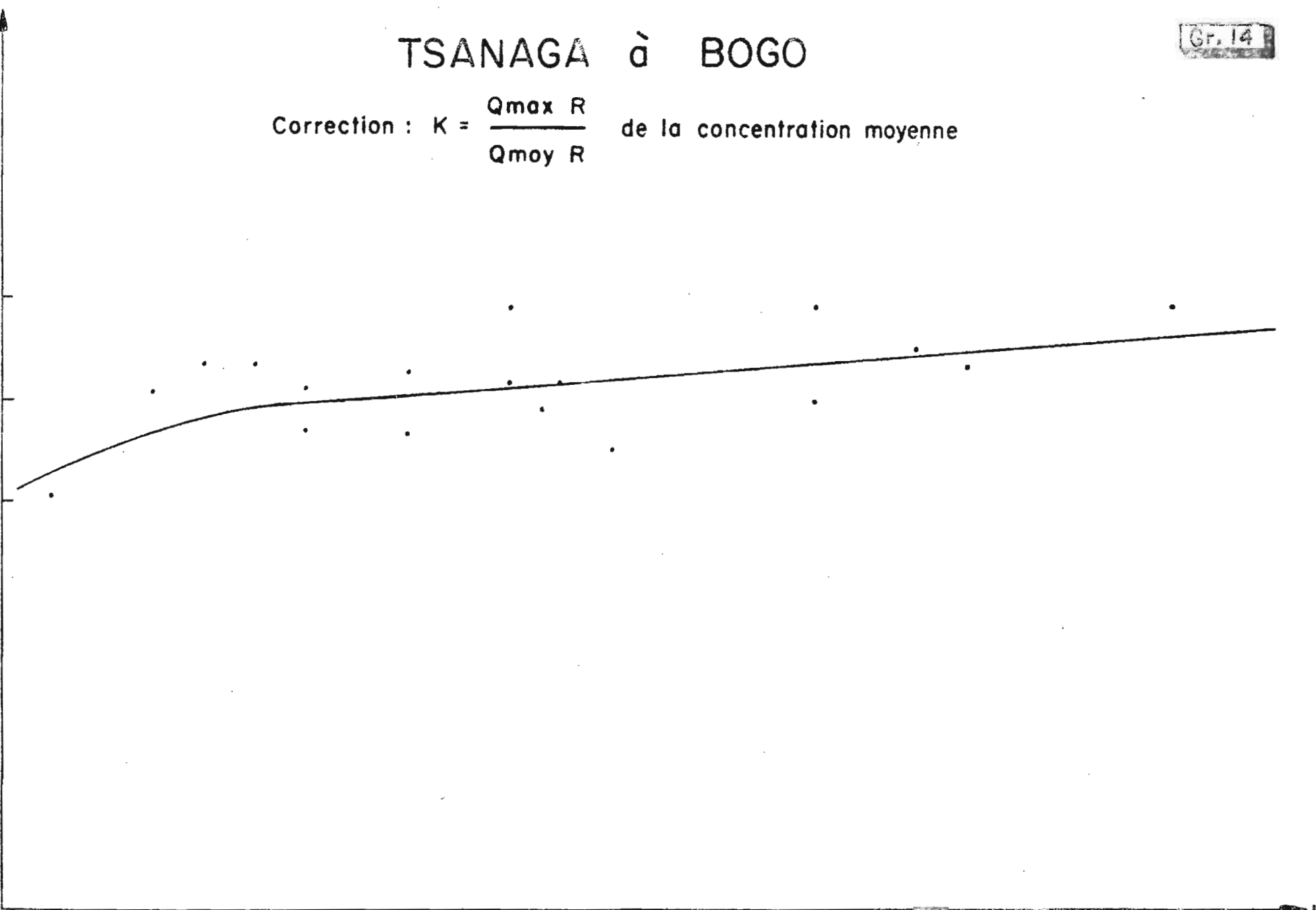
TSANAGA à BOGO

Correction : $K = \frac{Q_{max} R}{Q_{moy} R}$ de la concentration moyenne

$\Delta C_m R$
eng/l

+ 1
- 1

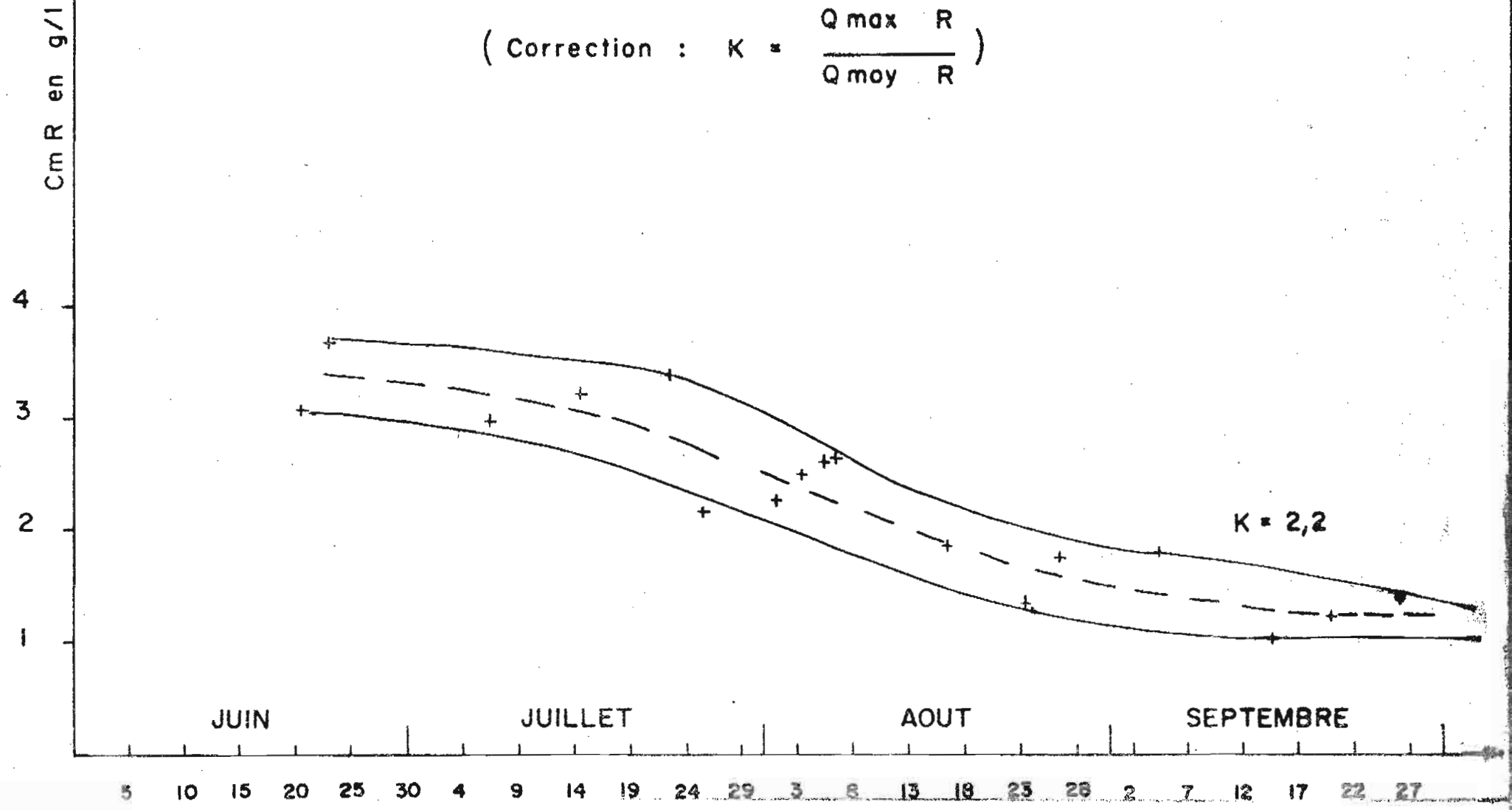
2,0 2,5 3,0 3,5



TSANAGA à BOGO

Concentrations moyennes corrigées

(Correction : $K = \frac{Q_{max} \cdot R}{Q_{moy} \cdot R}$)



Le graphique 16, sur lequel figure les variations de la concentration moyenne journalière et du débit moyen journalier en fonction du temps, montre bien l'importance primordiale de ce dernier facteur.

2 - 5 - Bilan : 1969

Les poids journaliers de matières solides transportées en suspension figurent dans le tableau ci-après.

Le Bilan annuel s'élève à 328.760 T, soit une dégradation spécifique de $214 \text{ T/Km}^2 \times \text{an}$. Ce qui correspond, en admettant une densité moyenne de 1,4 pour l'horizon du sol soumis à l'érosion, à une lame de sol équivalente de $153 \times 10^{-3} \text{ mm}$, valeur sous-estimée pour les mêmes raisons que pour la SANAGA, mais l'écart est certainement plus faible.

Sachant qu'au cours de cette année $281 \times 10^6 \text{ m}^3$ d'eau ont transité par la station de BOGO, la concentration moyenne annuelle a été de 1,17 g/l.

Malgré une pluviométrie largement supérieure à la moyenne ($P_{69} = 984 \text{ mm}$. ; $P_{\text{moy}} = 830 \text{ mm}$ environ) le module annuel est très proche du module interannuel ($8,9 \text{ m}^3/\text{s}$ contre $8,5 \text{ m}^3/\text{s}$ environ pour la moyenne) ; ce qui explique que la dégradation spécifique n'a pas été aussi forte que l'aurait laissé supposé la pluviométrie annuelle.

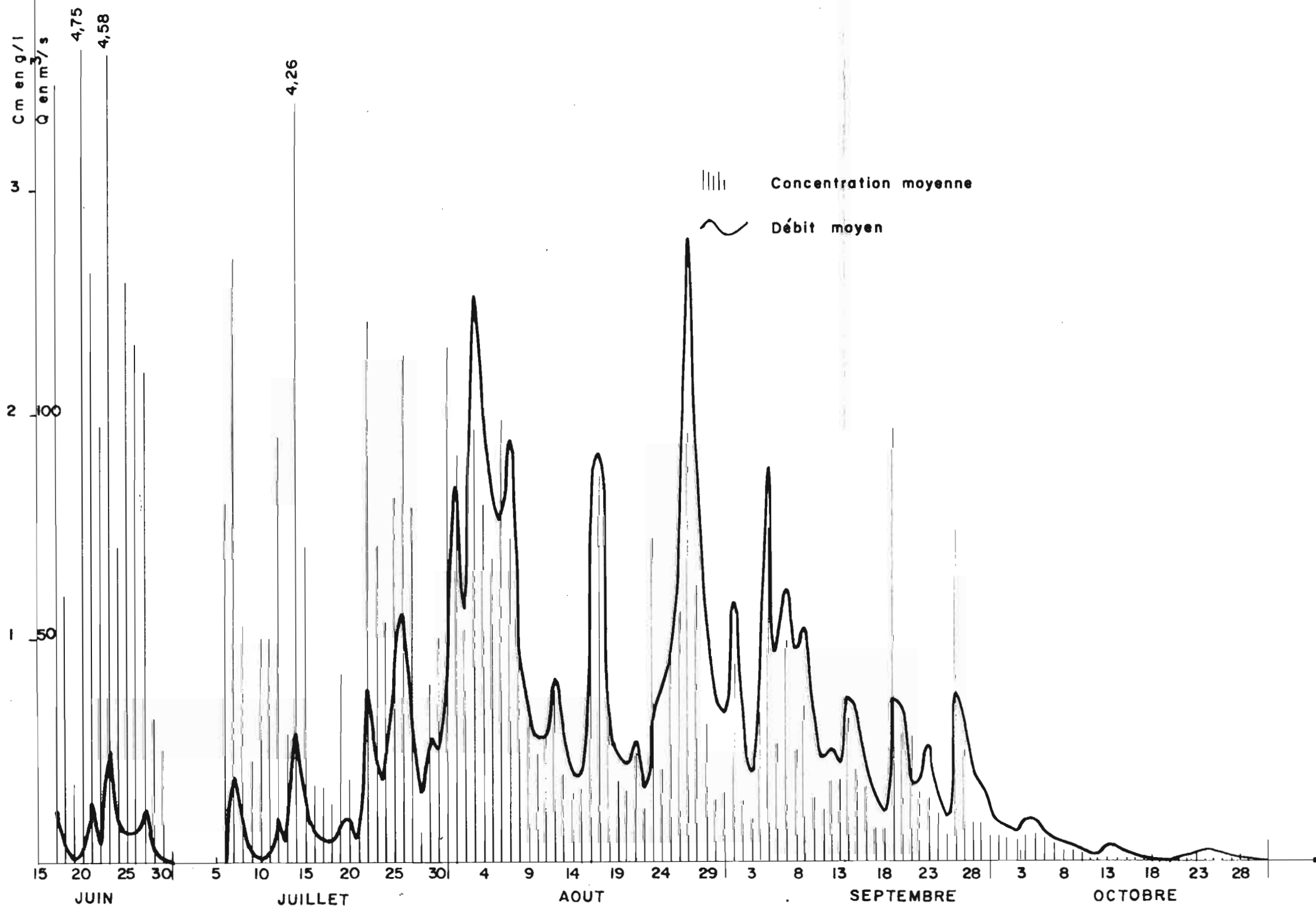
2 - 6 Variations interannuelles

Nous avons regroupé dans le tableau, ci-dessous, les principales caractéristiques des années 1968 et 1969 :

Q moy est le débit moyen mensuel, en m^3/s ,
P moy, la pluviométrie moyenne mensuelle, en mm,
Cm, la concentration moyenne mensuelle, en g/l.

Gr.16

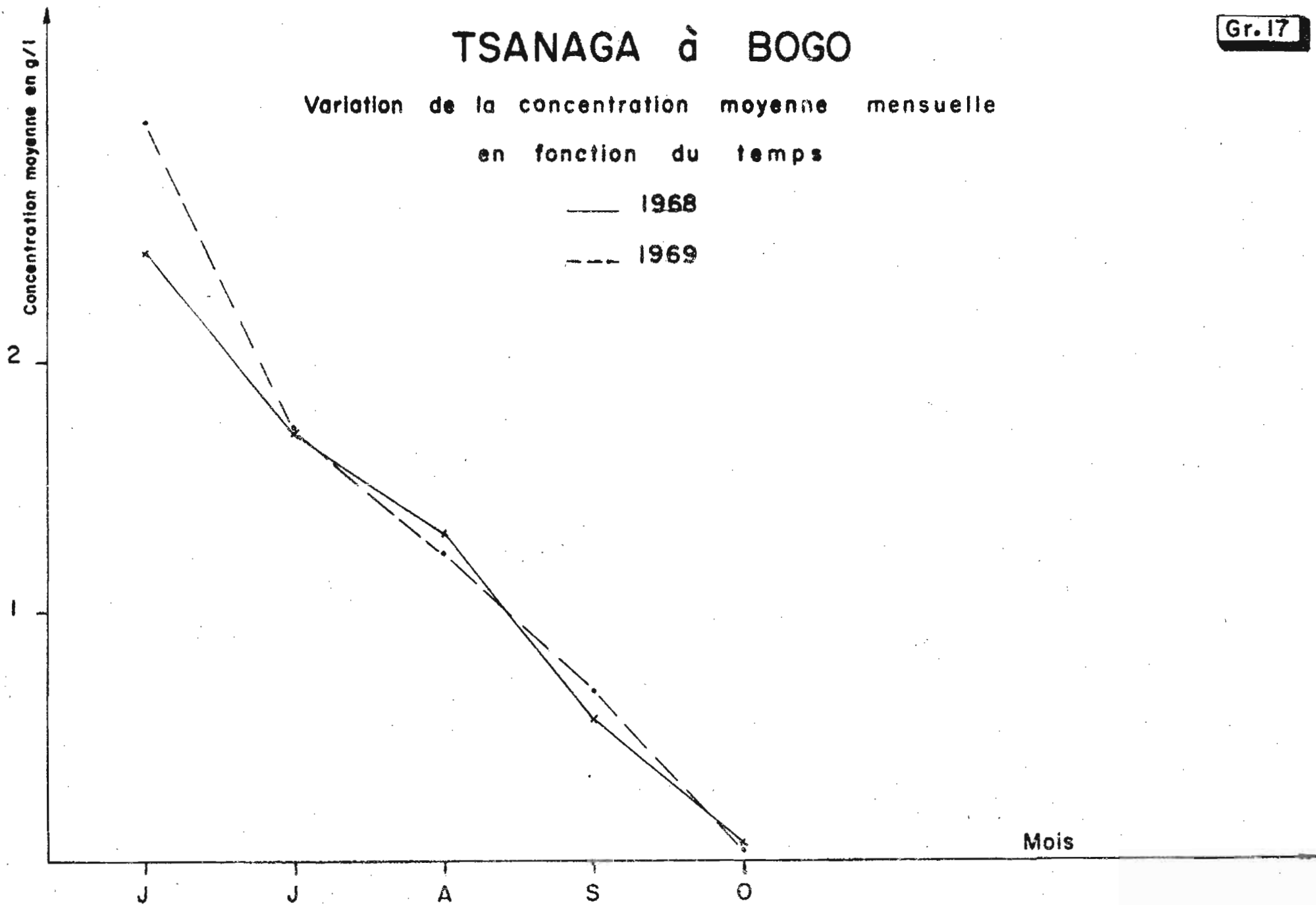
Variations de la concentration moyenne journalière et du débit moyen journalier



TSANAGA à BOGO

Variation de la concentration moyenne mensuelle
en fonction du temps

— 1968
- - - 1969



TSANAGA A BOGO

ANNEE 1969

Débits solides en tonnes / jour

Jours	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1							0	13.100	4.430	86		
2							0	5.040	740	69		
3							0	21.000	325	52		
4							0	14.200	1.930	93		
5							0	9.650	11.300	95		
6							560	13.000	2.090	46		
7							4.410	11.700	5.130	29		
8							740	4.000	2.050	17		
9							90	1.950	3.110	9		
10							78	1.190	790	5		
11							78	1.330	450	1,7		
12							1.760	2.660	770	0,4		
13							225	1.010	670	17		
14							10.600	515	2.020	9		
15							1.800	560	1.170	3,5		
16							190	6.010	530	0,9		
17						3.600	156	13.500	200	0,3		
18						505	104	2.015	140	0		
19						10	605	755	6.010	0		
20						1.830	305	580	1.620	0		
21						3.010	86	1.110	850	0,9		
22						655	8.210	325	480	1,7		
23						9.970	2.750	3.960	630	6		
24						1.060	1.670	1.370	290	10		
25						1.540	5.690	3.640	105	9		
26						1.320	10.400	7.990	4.730	4		
27						2.120	5.150	22.900	1.280	2,6		
28						153	173	8.570	280	0,9		
29						27	1.870	2.830	240	0,5		
30						0	2.200	830	110	0,2		
31							9.900	830		0,1		
Total						25.800		178.120	54.470	570		

Mois	Q moy m ³ /s	P moy mm	Cm g/l
	1968	1969	
J	3,40	3,35	164
J	23,4	15,0	224
A	46,2	54,0	269
S	28,9	30,7	96
O	1,30	2,85	9

	1968	1969
Poids total annuel	325.510 T	328.760 T
dégradation spécifique annuelle	212 T/Km ² x an	214 T/Km ² x an
Cm annuelle	1,27 g/l	1,17 g/l

Le graphique 17 montre la décroissance de la concentration moyenne mensuelle de Juin à Octobre pour les deux années de mesures.

Ces deux années présentent l'inconvénient majeur d'avoir des hydraulicités annuelles assez peu différentes. Malgré tout, la simultude des deux courbes du graphique 16 malgré des débits moyens mensuels parfois différents, par exemple le mois de Juillet, est suffisamment frappante pour être soulignée.

2 - 7 Conclusion

Le bassin de la TSANAGA est représentatif d'une zone qui englobe les versants orientaux des monts MANDARA et qui se prolonge vers l'Est par une vaste plaine alluviale. Les mayos de cette région descendent très rapidement des massifs et vont se perdre dans les immenses plaines (Yaérés) de la cuvette tchadienne où ils déposent les matériaux arrachés aux parties amont de leur bassin.

On peut considérer qu'en arrivant dans les Yaérés ces mayos ont eu une charge en suspension qui correspond à une dégradation spécifique moyenne de $210 \text{ T/Km}^2 \times \text{an}$ soit une lame de sol équivalente de 0,15 mm/an environ.

-3- Remarque

Un certain nombre de mesures complémentaires ont été effectuées tant à NACHTIGAL qu'à BOGO :

- Répartition granulométrique
- Variations des concentrations en fonction du temps (prélèvements toutes les 5 minutes, 10 minutes ou 30 minutes durant quelques heures).

Ces paramètres intervenant peu ou pas dans le calcul du bilan annuel nous n'avons pas fait figuré dans le présent rapport les résultats obtenus.

- 4 - Conclusion

Au terme des deux campagnes de mesures effectuées sur la SANAGA et la TSANAGA nous pouvons essayer de dégager un bilan moyen permettant de donner une première approximation de la dégradation spécifique moyenne, c'est-à-dire l'importance de l'érosion continentale, susceptible d'être observée sur ces deux types de bassins, l'un soumis au climat tropical de transition (Centre Cameroun), l'autre au climat tropical pur (Nord-Cameroun).

Rivière	SANAGA	TSANAGA
Station	NACHTIGAL	BOGO
Superficie B V	77.000 Km ²	1.535 Km ²
Sous sol	roches : métam., éruptives, volc., sédiment.	roches : métam. et éruptives roches vertes
Hauteur moyenne précipitations annuelles	(1.580 mm)	830 mm
Végétation	Savane 40 % Savane + galerie 30 % Forêt 30 %	Savane arborée (faible densité)
pentcs	moyennes	forte sur la moitié du bassin
Régime hydrologique	tropical transition	tropical
Module spécifique	15,3 l/s x Km ²	5,5 l/s x Km ²
Dégradation moyenne	28 T/Km ² x an	210 T/Km ² x an
lame équivalente érodée	0,02 mm/an	0,15 mm/an
Turbidité moyenne	58 g/m ³	1.200 g/m ³

En fait, le chiffre de 0,02 mm/ an devrait être assez fortement majoré et celui de 0,15 mm/an est sûrement un peu trop faible, mais le rapport entre les deux chiffres ne doit pas être très différent du rapport réel.

Le devenir des matières solides transportées par ces deux rivières est différents. Les matériaux de la SANAGA arrivent jusqu'à l'océan ou au moins à proximité de son embouchure ; alors que le caractère endoreïque de la TSANAGA fait que l'alluvionnement produit un vaste cône de déjection qui recouvre les dépôts lacustres anciens du Sud-Ouest de la cuvette tchadienne.