

J.-F. NOUVELOT (*)

Mesure et étude des transports solides en suspension au Cameroun

Les premières mesures de transports solides, entreprises dans le Nord-Cameroun en 1955-1956, à la fois sur des petits bassins versants (Mayo Kereng, Mayo Kalliao, Mayo Bouloré) et des grands cours d'eau (Faro et Bénoué), avaient permis de dégager qualitativement certaines tendances.

L'étude systématique des matières en suspension, sur l'ensemble des cours d'eau du Cameroun, n'a commencé, d'ailleurs assez timidement, qu'en 1966. Le premier programme établi par M. LEFEVRE visait surtout à mettre au point une méthodologie applicable à la fois sur les petits cours d'eau et les grands fleuves. Progressivement s'est élaboré un plan d'études cohérent, la multiplicité et parfois même le caractère acrobatique des mesures demandant un personnel important et bien entraîné.

C'est en fait l'ensemble des hydrologues** de la section de Yaoundé qui ont participé à ces mesures.

Cinq zones d'action ont été retenues :

- le Mbam à Goura ;
- la Sanaga à Nachtigal et le Djerem à Mbakaou pour le bassin de la Sanaga ;
- le Risso et le Rao pour le bassin de la Vina du Nord (bassin du Tchad) ;
- les mayos Tsanaga, Kalliao et Motorsolo pour le Nord-Cameroun
- la Monkie et le Noun à Bamendjing pour le bassin du Noun.

Le présent article ne traitera que des quatre premières zones, le bassin du Noun faisant l'objet d'une étude particulière.

La méthodologie ainsi élaborée vient compléter celles qu'ont mis au point parallèlement J. COLOMBANI au Togo et B. BILLON au Tchad et qui ont fait l'objet de développements dans de précédents cahiers (vol. IV n° 2 1967 et vol. V n° 2 1968).

Chargé de Recherches O.R.S.T.O.M. (Centre de Yaoundé, Cameroun).

** MM. LEFEVRE, NOUVELOT, CADIER, Ingénieurs. BAZILE, BOREL, DELFIEU, HOORELBECKE, ROUQUEROL, Agents Techniques.

I. — METHODOLOGIE DES MESURES

1.1. — Prélèvements.

Le matériel utilisé est sensiblement le même que celui employé couramment en hydrologie — câble gradué, bateau (Zodiac type Mark II ou Mark III), saumon de 25, 50 ou même 100 kg, treuil et câble électroporteur, moulinet (pour les mesures de vitesses) et, éventuellement, sur les petites rivières, passerelle et perche — auquel viennent s'ajouter une pompe Japy et un lot de jerricans de 10 litres en plastique.

Suivant la puissance du courant et la profondeur de la rivière nous utilisons des saumons de poids différents — 25 à 100 kg — de sorte qu'il n'est pas nécessaire de mesurer l'angle du câble avec la verticale.

L'extrémité du tuyau d'aspiration, fixé au saumon ou à la perche, peut être descendue à la profondeur voulue.

Nous avons, tout d'abord, utilisé une prise d'échantillons composée d'un tube métallique coudé à angle droit et fixé sur le saumon. Avec un tel montage le tuyau en caoutchouc, bien que renforcé, avait tendance à s'écraser juste au-dessus de sa fixation sur la prise métallique. Nous avons remédié à cet inconvénient en coudant très légèrement la prise d'échantillons : 140 à 160°, au lieu de 90°.

Cette méthode, maintenant très classique si les matériaux transportés sont assez fins, à l'avantage de donner des échantillons importants. L'inconvénient majeur est que, généralement, la vitesse dans l'ajutage de prélèvement est différente de la vitesse du courant au point de mesure.

Les prélèvements de 10 litres sont décantés sur place, ou en laboratoire, suivant le lieu de mesures, dans des dames-jeannes de 10 litres en verre transparent, par adjonction de 5 à 10 cm³ d'acide chlorhydrique N/10. Le résidu, après siphonnage, est filtré, séché à l'étuve à 105° et pesé.

1.2. — Calcul du débit solide.

Le dépouillement est tout à fait semblable à celui d'un jaugeage classique. En un certain nombre de points, répartis sur plusieurs verticales, on a mesuré simultanément la vitesse V du courant et la concentration C des matériaux en suspension. En portant, pour chaque verticale, le produit CV en fonction de la profondeur, on obtient une série de « paraboles » dont la surface nous donne le débit solide par unité de largeur dans la section — q_s — dont l'équation aux dimensions est $ML^{-1}T^{-1}$. L'intégration de ces débits unitaires, le long de la section, donne le débit solide total Q_t :

$$Q_s = \int_0^L \int_0^P q_s dl dp ;$$

équation dans laquelle :

l : est l'abscisse dans la section ;

p : la profondeur ;

L : la largeur totale ;

P : la profondeur totale d'une verticale donnée.

Q_s a pour équation aux dimensions MT^{-1} ; on l'exprime généralement en kg/s ou g/s, suivant l'importance du transport solide.

1.3. — Granulométrie des sédiments.

Diverses recherches ont montré que le transport solide peut être considéré comme proportionnel aux caractéristiques hydrauliques du courant si les particules en suspension ont un diamètre supérieur à 0,01 mm. Or, il est incontestable que toutes les rivières que nous avons étudiées transportent des matériaux dont un fort pourcentage est constitué d'argiles ou de limons fins dont le diamètre est inférieur à 0,02 mm, ce qui signifie que l'influence de la vitesse de l'eau et de la turbulence est faible puisque ces grandeurs sont liées aux caractéristiques hydrauliques du courant.

Il y a donc peu d'inconvénients à utiliser une pompe pour prélever nos échantillons, le principal défaut de cette méthode étant de perturber le champ des vitesses, ce qui, nous venons de le voir, a très peu d'influence sur les particules fines.

Les turbidités mesurées, sauf dans les mayos du Nord-Cameroun, sont généralement faibles. Il est, dans ces conditions, difficile de procéder à des mesures granulométriques précises.

Plusieurs méthodes ont donc été utilisées :

a) Analyse du résidu sec de chaque prélèvement lorsque la concentration est suffisante (quelques grammes pour 10 litres au minimum).

b) Groupement de plusieurs échantillons pris sur des verticales différentes, mais aux mêmes profondeurs.

c) Groupement de tous les prélèvements, dans les cas extrêmes où les turbidités sont très faibles.

La classification granulométrique adoptée est la suivante :

Argile	$d \leq 2 \mu$
Limon fin	$2 \mu < d < 20 \mu$
Limon grossier	$20 \mu < d < 50 \mu$
Sable fin	$50 \mu < d < 200 \mu$
Sable grossier	$200 \mu \leq d$

Jusqu'à 50 μ les différentes fractions sont déterminées par une méthode fondée sur la loi de STOKES qui lie le diamètre des particules à la vitesse de chute. Au-delà de 50 μ , les deux dernières fractions sont déterminées au tamis.

II. — ESTIMATION DES ERREURS DE MESURES

2.1. — Erreurs dues aux mesures en rivière.

2.1.1. - Mode et vitesse de prélèvement.

On peut, tout d'abord, penser que le mode de prélèvement est une cause d'erreur systématique non négligeable. Nous avons, dans ce but, prélevé, tout d'abord un échantillon de 10 litres à l'aide d'une pompe Japy et ensuite 10 litres au seau. L'erreur relative serait généralement voisine de 10 % — souvent inférieure — les prélèvements faits au seau donnant systématiquement les résultats les plus faibles. Il est possible néanmoins que le seau n'ait pas été descendu assez profondément.

L'ajutage de prélèvement modifiant le champ de vitesses, les concentrations mesurées sont, nécessairement, différentes des concentrations réelles, et l'échantillon prélevé a une distribution granulométrique perturbée.

Avec une pompe Japy n° 2 et un ajutage de 17 mm de diamètre, un opérateur moyen prélève un échantillon de 10 litres en 23 secondes, soit une vitesse voisine de 1,8 m/s dans l'ajutage. La vitesse dans le tuyau en caoutchouc de 20 mm de diamètre est alors de 1,3 m/s. Un opérateur rapide arrive à remplir le même jerrican en 15,5 secondes, soit des vitesses de 2,9 m/s dans l'ajutage et voisines de 2 m/s dans le tuyau en caoutchouc.

Quoi qu'il en soit, ajuster la vitesse de prélèvement à la vitesse du courant semble une tâche difficilement réalisable avec une simple pompe Japy. Nous pensons que l'importance des échantillons prélevés compense largement l'imperfection du prélèvement.

Dans le cas de grandes rivières, comme la Sanaga à Nachtigal ou le Mbam à Goura, les cotes variant très lentement il est possible de faire un jaugeage complet avant d'entreprendre les prélèvements d'eau. Sur les petites rivières comme le Risso, ou les mayos du Nord-Cameroun, les cotes et par conséquent les débits variant rapidement, il est très difficile de mesurer à la fois les vitesses et de faire suffisamment de prélèvements. Il nous semble alors préférable de multiplier les prises d'échantillons et de prendre pour concentration moyenne la moyenne arithmétique des concentrations.

La figure 1 montre que pour la Sanaga à Nachtigal la moyenne arithmétique des concentrations est généralement supérieure à la concentration moyenne : $C_{arith} = 1,02 C_m$, soit une erreur relative voisine de 2 %.

Pour le Mbam à Goura, où la turbidité est généralement plus forte et le brassage moins bon, l'erreur est voisine de 3 à 4 %.

Pour le Risso à S3 (bassin versant de 32,6 km²) l'erreur serait en moyenne de 4 ou 5%. Sur un bassin à forte pente, tel que le Risso à S2 (bassin versant de 14 km²), elle est pratiquement nulle.

En général l'écart est faible et la moyenne arithmétique des mesures ponctuelles est une bonne approximation de la concentration moyenne.

Toujours dans le but de multiplier au maximum les mesures, nous avons cherché s'il était possible, à partir de prélèvements effectués en surface, de connaître avec suffisamment de précision le débit solide total.

La figure 2 donne les corrélations entre C_m et C_m surface à — 20 cm et — 50 cm pour la Sanaga à Nachtigal. Le brassage étant bon, puisque la section de mesures se trouve au pied d'une série de rapides, toutes les concentrations sont proches les unes des autres.

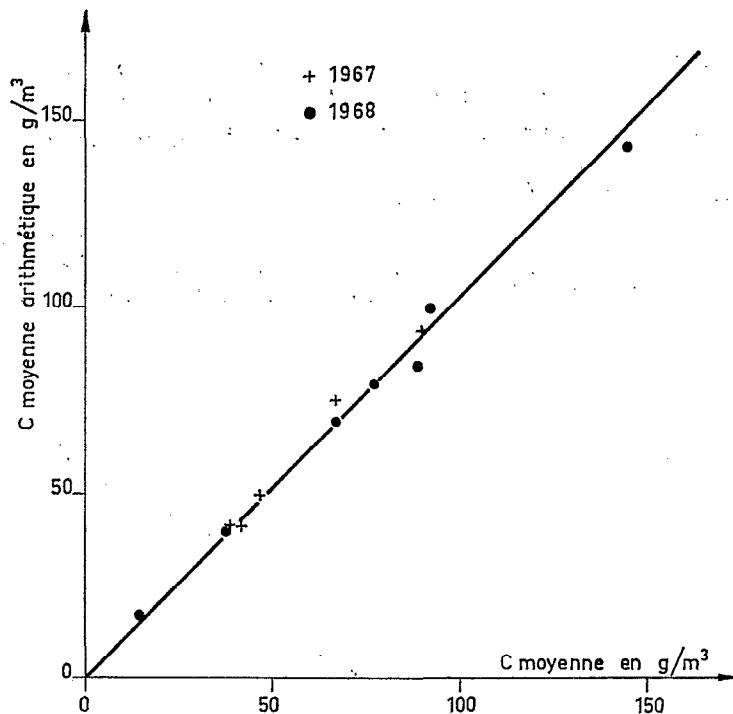


FIG. 1. — SANAGA A NACHTIGAL

Relation entre la concentration moyenne et la moyenne arithmétique des concentrations ponctuelles.

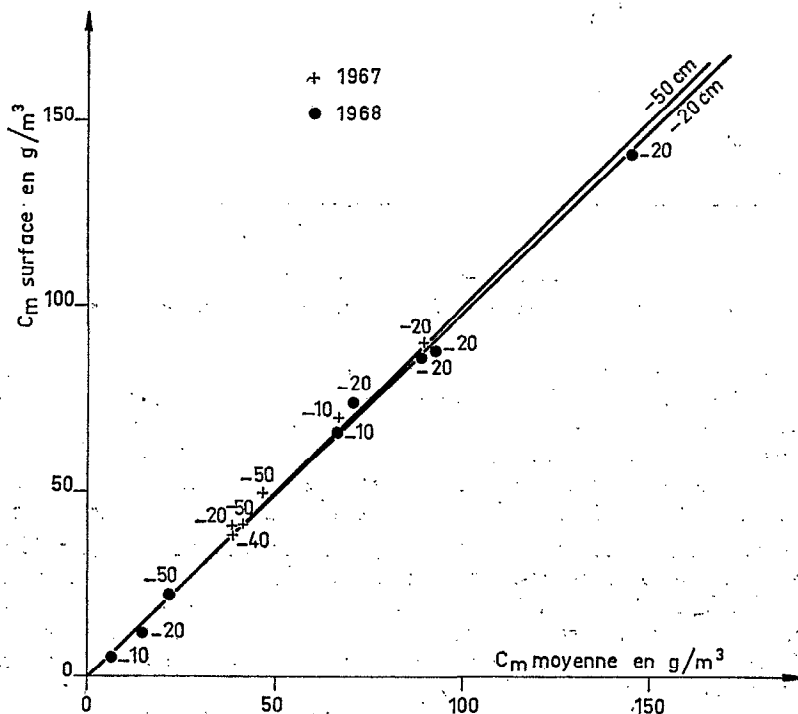


FIG. 2. — SANAGA A NACHTIGAL

Relation entre la concentration moyenne dans la section et la concentration moyenne mesurée près de la surface.

Pour le Mbam à Goura les concentrations à — 20 cm sont nettement inférieures à celles prélevées à — 50 cm, surtout pour les fortes turbidités (fig. 3).

La concentration en surface n'est proche de la concentration moyenne que si le brassage est bon.

2.1.2. - Répartition des points de mesure.

Généralement les prélèvements sont effectués en 24 points répartis dans la section sur 6 verticales. Lorsque les cotes varient très lentement (Sanaga, Mbam) nous effectuons toujours un jaugeage complet avant d'effectuer les prélèvements, soit 60 à 90 mesures de vitesse réparties sur 12 à 15 verticales.

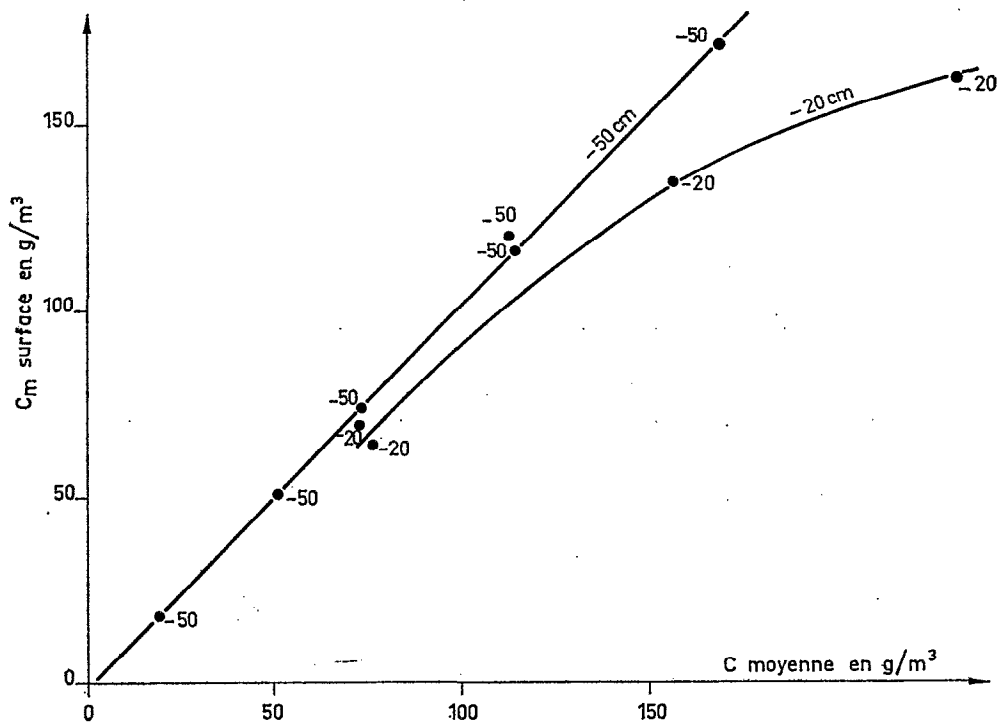


FIG. 3. — MBAM A GOURA

Relation entre la concentration moyenne dans la section et la concentration moyenne mesurée près de la surface.

A partir des 24 mesures de turbidité, il est possible de tracer, soit des courbes isoconcentration, soit des courbes d'isoprofondeur et d'obtenir ainsi par interpolation, pour une profondeur donnée sur les verticales où ont été faites uniquement des mesures de vitesse, une valeur plus ou moins approximative de la turbidité. Malgré tout, il semble difficile de préciser l'ordre de grandeur de l'erreur due au nombre et à la répartition des points de prélèvement, sans faire plusieurs mesures complètes de débits solides comprenant au moins 60 échantillons.

A la suite de quelques essais faits sur la Sanaga à Nachtigal qui présente l'avantage d'avoir un bon brassage, il semble plus intéressant de multiplier les verticales que le nombre de points sur ces verticales. La figure 4 montre la répartition des turbidités en fonction de la profondeur sur deux verticales différentes. Il est certain que pour des rivières plus calmes que la Sanaga la répartition verticale des concentrations est certainement moins uniforme et moins serrée. Quoi qu'il en soit, il n'est pas souhaitable de descendre trop près du fond du lit où se manifeste le transport par charriage qui, dans les cas qui nous concernent, représente une très faible part des matériaux si on considère la faible proportion de section intéressée et les faibles vitesses, malgré des concentrations relativement élevées.

2.1.3. - *Fréquence des mesures.*

Pour le calcul des débits moyens journaliers on se contente souvent, pour les grandes rivières, d'une lecture de cote par jour, la courbe de tarage permettant de passer facilement des hauteurs aux débits. Pour le calcul des poids de matières transportées en suspension le problème est plus complexe puisqu'à une cote donnée ou un débit donné ne correspond pas une seule turbidité. Par conséquent, pour établir un bilan journalier, une mesure par jour est indispensable.

Étant donné qu'il n'est pas concevable de faire quotidiennement une série de prélèvements, nous avons pensé qu'il pourrait être avantageux de chercher une corrélation entre la concentration calculée à partir d'une mesure complète et celle obtenue à partir d'un échantillon pris toujours dans les mêmes conditions, le point de prélèvement étant choisi suffisamment dans le courant et pas trop près des berges.

La figure 5 donne la corrélation obtenue pour la Sanaga à Nachtigal. Étant donné le peu de points dont nous disposons la précision est voisine de 20 %.

Dans le cas de petites rivières le problème est encore plus complexe, les variations de cote étant très rapides. Pour chaque crue un minimum de trois séries de mesures est nécessaire : une à la montée, une proche du maximum et une à la décrue. En l'absence de variations brutales de cote les prélèvements peuvent être espacés.

2.2. — Erreurs dues aux manipulations en laboratoire.

2.2.1. - *Volume prélevé et siphonnage.*

Les échantillons sont transvasés des jerricans en plastique dans des dames-jeannes de 10 litres étalonnées. L'erreur faite sur les volumes est ainsi très largement inférieure à 1 %.

Après adjonction de l'acide chlorhydrique et un repos de 24 heures au minimum, on siphonne les dames-jeannes, le volume restant ne devant pas excéder 500 ml. Pour cela, le tube de siphonnage est fixé à une petite baguette de bois de manière que son extrémité se trouve à 3 ou 4 cm au-dessus du fond du récipient. Cette opération doit être menée avec beaucoup de précautions pour ne pas remettre un certain nombre de particules en suspension, d'où la nécessité d'utiliser des récipients transparents.

2.2.2. - *Filtration.*

Nous avons préféré utiliser la filtration, plutôt que l'évaporation, pour plusieurs raisons :

- cette méthode ne demande aucun transvasement supplémentaire et la quantité d'eau de rinçage peut être importante sans trop de gêne ;
- le pH de la solution se situant entre 3 et 4, nous ne précipitons aucun des sels se trouvant en solution. Seule une quantité infime de silice peut éventuellement être précipitée. Il ne reste donc sur le filtre que les matières solides.
- il est beaucoup plus facile de mettre 24 filtres dans un dessiccateur ou une étuve de terrain que 24 béciers ; de plus, *aucun risque de casse* n'est à craindre ;
- le seul inconvénient est qu'il est *nécessaire de connaître le poids de chaque filtre* avec une bonne précision et que, plus le pH de la solution est faible, plus le *temps de filtration est long*.

2.2.3. - *Pesée.*

Une excellente précision sur les pesées serait illusoire, cette opération se situant au terme d'une série de manipulations, dont certaines sont des causes d'erreurs difficilement chiffrables.

Les pesées sur le terrain sont faites à l'aide de trébuchets dont la précision est de 5 mg. C'est, généralement, suffisant pour les régions où ils sont utilisés. Bon nombre de mesures sont faites en laboratoire où nous disposons d'une balance à lecture directe dont la précision est de l'ordre du 1/10 mg, ce qui est suffisant, même pour des concentrations inférieures à 50 g/m³.

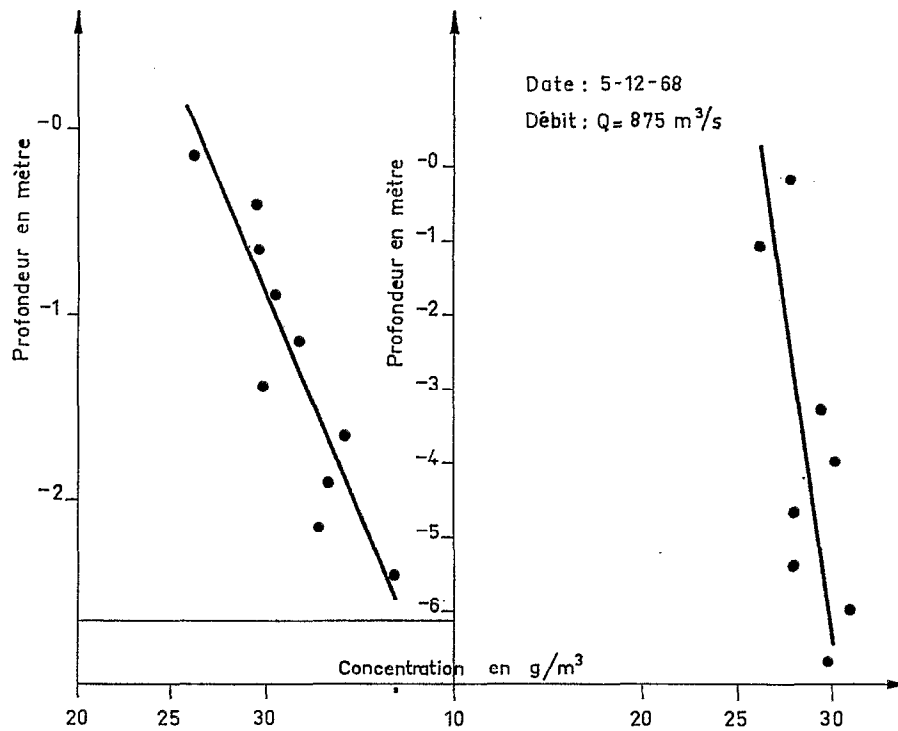


FIG. 4. — SANAGA A NACHTIGAL
Variations de la turbidité avec la profondeur.

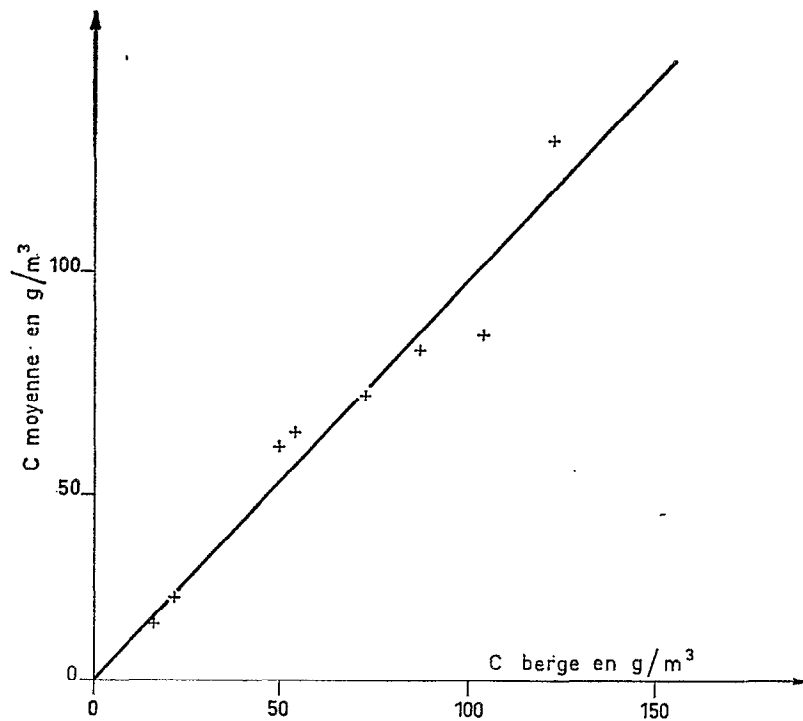


FIG. 5. — SANAGA A NACHTIGAL
Corrélation entre la concentration moyenne et la concentration d'un échantillon de 10 litres près de la berge.

Quoi qu'il en soit, un certain nombre de précautions doivent être prises au cours de chaque pesée :

a) Les filtres et les résidus secs doivent être pesés froids, l'air chaud créant une dépression qui fait paraître les corps moins lourds si on les pose sur la balance à la sortie de l'étuve.

Nous comparons dans le tableau ci-après, les poids :

1° d'un filtre nu	4,15 g
2° d'un filtre + résidu sec	Pt = 6,68 g
3° d'un filtre + résidu sec	Pt = 26,98 g

tout d'abord, chauds à la sortie de l'étuve (105°), puis froids à la sortie du dessiccateur, l'humidité relative étant de 41 % et la température ambiante de 25 °C.

Sortie étuve P en g	4,125	6,640	26,915
Sortie dessiccateur P en g	4,150	6,675	26,980
Erreur relative en ‰	6 ‰	5 ‰	2,5 ‰
Erreur absolue en g	0,025	0,035	0,065

b) Travaillant sur des résidus secs dont les poids sont parfois inférieurs au gramme ou même au demi-gramme, l'utilisation d'un dessiccateur est indispensable si on veut refroidir les filtres sans qu'ils absorbent trop d'humidité.

Nous avons entrepris une série de mesures montrant l'influence du taux d'humidité de l'air sur les pesées.

Pesées en climat sec :

Ces pesées ont été faites à Maroua (Nord-Cameroun) à l'aide d'un trébuchet.

Premier essai : Température 25° — humidité relative 41 %.

N° filtre	Temps	1 mn	2 mn	5 mn	10 mn	30 mn	60 mn	Erreur absolue maximale
1	en g	4,150	4,165	4,175	4,190	4,225	4,240	0,090
2	en g	6,675	6,690	6,700	7,720	6,755	6,775	0,100
3	en g	26,980	27,000	27,030	27,070	27,115	27,185	0,205

Deuxième essai : Température 33 °C — humidité relative 29 %.

N° filtre	Temps	1 mn	2 mn	5 mn	10 mn	30 mn	60 mn	Erreur absolue maximale
1	en g	4,150	4,165	4,185	4,195	4,200	4,205	0,055
2	en g	6,650	6,665	6,680	6,695	6,700	6,715	0,085
3	en g	26,955	26,980	27,010	27,040	27,080	27,135	0,180

Nous pouvons constater que le taux d'humidité relative a une certaine importance, en particulier, pour la pesée des filtres nus (n° 1) qui présentent l'inconvénient d'être passablement hydrophiles. Un opérateur moyen, travaillant sur un trébuchet, fait une pesée en 2 ou 3 minutes ce qui diminue sensiblement l'erreur absolue commise.

Pesées en climat humide :

Ces pesées ont été faites en laboratoire, à Yaoundé, à l'aide d'une balance à lecture directe.

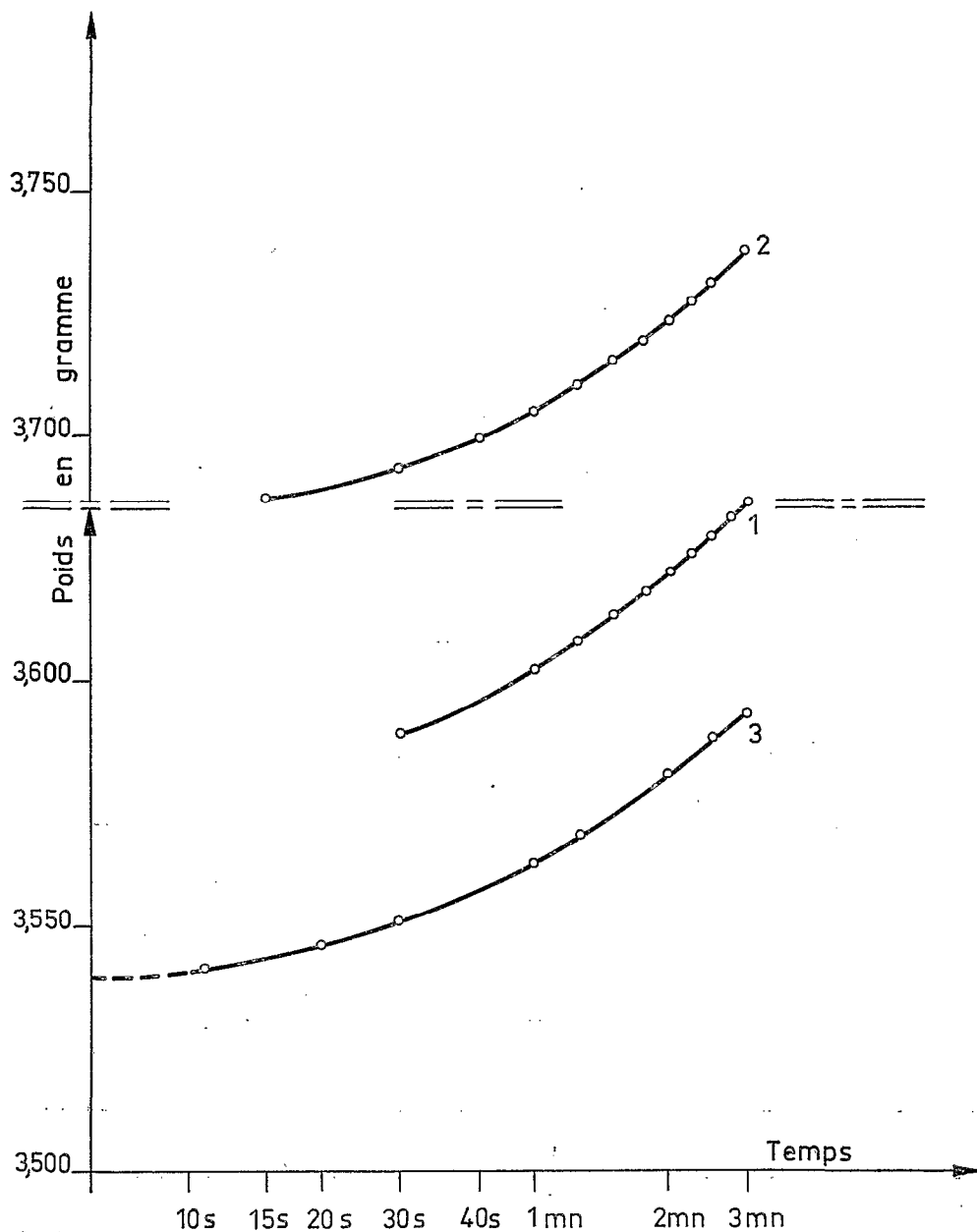


FIG. 6. — Variation du poids de filtres nus, en fonction du temps en climat chaud et humide. (Yaoundé-82% d'humidité relative.)

La durée d'une pesée étant généralement très inférieure à 3 minutes, toutes nos expériences ont été faites sur ce laps de temps. L'humidité relative était de 82 %.

La figure 6 montre les résultats obtenus pour 3 filtres nus. Dans les 3 cas le gain de poids a été de 50 mg entre 15 secondes et 3 minutes.

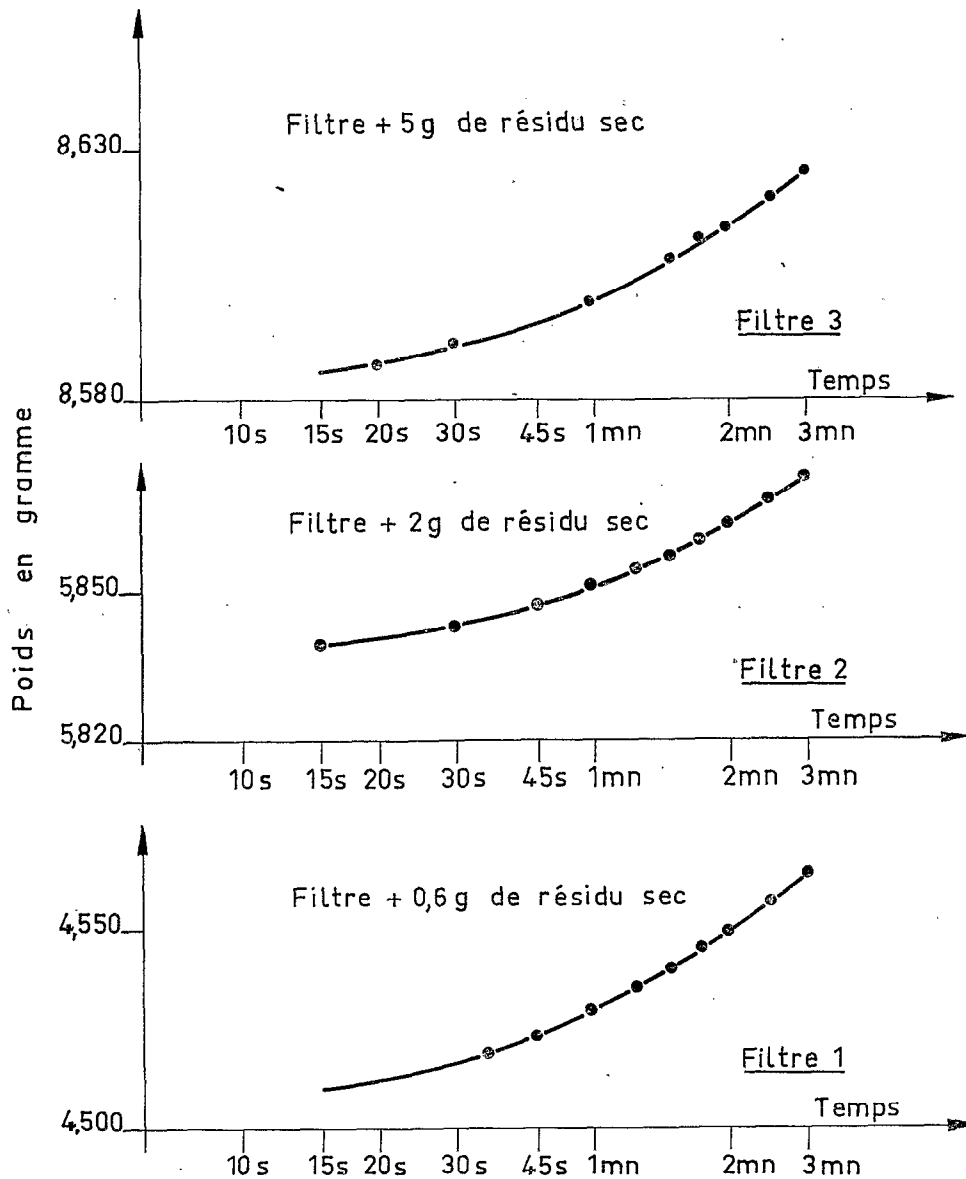


FIG. 7. — Variations du poids d'un filtre + résidu sec en fonction du temps en climat chaud et humide. (Yaoundé 82% d'humidité relative.)

La figure 7 est relative à des filtres contenant des résidus secs de poids différents :

- (1) Filtre + résidu sec de 0,6 g
- (2) Filtre + résidu sec de 2 g
- (3) Filtre + résidu sec de 5 g

Entre 15 secondes et 3 minutes le poids du filtre (1) a augmenté de 43 mg, celui de (2) de 34 mg et celui de (3) de 40 mg.

Un filtre chargé est donc moins hydrophile qu'un filtre nu, la répartition du résidu sec sur le filtre ayant probablement une certaine importance.

Le temps de pesée, avec une balance à lecture directe, est généralement inférieur à 1 minute, pendant ce laps de temps un filtre nu voit son poids augmenter de 25 mg et un filtre chargé de 12 à 17 mg.

Si nous appelons : PF le poids du filtre nu ;
PR le poids du résidu sec ;
PT le poids total :

$$PR = PT - PF.$$

Or, nous savons que l'erreur absolue commise sur les pesées est faite systématiquement dans le même sens, par conséquent : $\Delta R = \Delta T - \Delta F$. Sachant que $\Delta T < \Delta F$ le poids PR du résidu sec est donc connu par défaut.

La valeur absolue de cette erreur doit se situer entre 0 et 15 mg, alors que les poids des résidus secs sont compris généralement entre 100 mg et plusieurs dizaines de grammes. Par conséquent, pour de faibles turbidités, l'erreur relative pourrait atteindre 15 % dans les hypothèses les plus pessimistes, à condition toutefois que le filtre nu soit pesé sensiblement dans les mêmes conditions que le filtre chargé, ce qui, dans la pratique, est facilement réalisable.

Conclusion :

Il est difficile de chiffrer la précision avec laquelle est connu un débit solide. Nous pensons qu'en prenant le maximum de précautions il est possible d'obtenir une erreur relative inférieure à 5 %, mais que, dans certains cas défavorables, cette erreur atteint et dépasse même 25 %.

III. — DÉBIT SOLIDE DE LA SANAGA A NACHTIGAL

3.1. — Caractéristiques géographiques.

La station de Nachtigal présente les caractéristiques suivantes :

Latitude	4° 21' N
Longitude	11° 38' E
Altitude du zéro de l'échelle	425,909 m
Superficie du bassin versant	77 000 km ² .

Le haut bassin de la Sanaga est formé d'une succession de plateaux (Adamaoua) à la limite desquels se situe une série de chutes (chutes du Djerem à l'aval de Mbakaou, chutes du Lom à Bangbel).

Plus à l'aval, s'étendent les plateaux du Pangar et une région de collines dont l'altitude oscille entre 600 et 700 m.

Sur les plateaux les pentes sont faibles et les zones d'épandage nombreuses : le Djerem et le Meng dans la région de Tibati, le Lom à Litala.

A hauteur d'Ebaka la Sanaga passe de la direction N. S. à la direction E. O., sa pente devient alors assez forte.

3.2. — Caractéristiques géologiques, pédologiques et phytogéographiques.

A part quelques recouvrements sédimentaires (grès du crétacé moyen) et volcaniques, dans le haut bassin du Djerem, le sous-sol est formé uniquement de formations précambriennes, roches métamorphiques ou éruptives.

Les sols sont des sols ferrallitiques :

Sols complexes de savanes, remaniés avec des concrétions et débris de cuirasse.

Sols ferrallitiques typiques rouges, dérivés de roches métamorphiques.

La végétation se répartit ainsi :

- 40 % de savanes arbustives et arborées ;
- 30 % de savanes et galeries forestières ;
- 30 % de forêt.

3.3. — Régime hydrologique.

Le bassin de la Sanaga à Nachtigal est soumis, dans sa quasi-totalité, au régime tropical de transition qui se caractérise par une pointe de crue en septembre-octobre et un étiage en février-mars. Il arrive qu'on enregistre, certaines années, une petite décrue en août.

Ses valeurs caractéristiques sont :

Étiage caractéristique	240 m ³ /s
Module	1 180 m ³ /s
Crue maximale observée.....	4 225 m ³ /s (1964)

3.4. — La station et les mesures.

La section de mesures se situe à hauteur du passage du bac de la route Yaoundé-Bafoussam, à quelques centaines de mètres en aval de rapides. Elle présente les caractères suivants :

- largeur : 300 mètres ;
- fond rocheux ;
- présence en rive gauche d'une fosse de 120 m de large.

Les mesures de débit solide ont débuté en août 1967 et se sont poursuivies régulièrement tout au long de l'année hydrologique 1968-1969.

Tous les résultats sont consignés dans le tableau ci-dessous qui contient :

H : la hauteur d'eau lue à l'échelle, en cm ;

Q : le débit, en m³/s ;

Q_s : le débit solide, en kg/s ;

C_m : la concentration moyenne, en g/m³ ;

$$C_m = \frac{Q_s}{Q} ;$$

C_M : la concentration maximale mesurée, en g/m³.

N°	Date	H (cm)	Q (m ³ /s)	Q _s (kg/s)	C _m (g/m ³)	C _M (g/m ³)	Observations
1	2-8-67	197	1 230	111	90	124	
2	1-9-67	229	1 695	114	67	100	
3	26-10-67	320	2 800	117	42	58	
4	3-11-67	252	1 960	92	47	54	
5	13-11-67	220	1 500	59	39	51	
6	31-5-68	82	380	5,8	15	28	
7	21-6-68	142	810	72	89	106	
8	12-7-68	148	852	124	145	155	
9	6-8-68	228	1 680	279	166		partiel
10	8-8-68	236	1 765	243	138		partiel
11	19-8-68	247	1 815	169	93	129	
12	13-9-68	252	1 932	137	77	89	
13	4-10-68	310	2 740	189	67	99	
14	28-10-68	274	2 240	124	55		partiel
15	22-11-68	203	1 350	51	38	49	
16	5-12-68	150	875	26	30		partiel
17	20-12-68	131	720	16	22	28	
18	29-1-69	072	334	2,2	6,5	10	
19	5-3-69	066	308	0,74	2,4	8	

Le tableau suivant donne le seul résultat de granulométrie des sédiments transportés en suspension que l'on ait :

Prélèvement du 26-10-67 : Q = 2 800 m³/s ;

Q_s = 117 kg/s.

Profondeur en cm		50	300	500
Argile	%	75	77	65
Limon fin	%	10	10	21
Limon grossier	%	8	7	8
Sable fin	%	6	5	5
Sable grossier	%	1	1	1

Le brassage étant excellent la granulométrie varie très faiblement avec la profondeur (fig. 8).

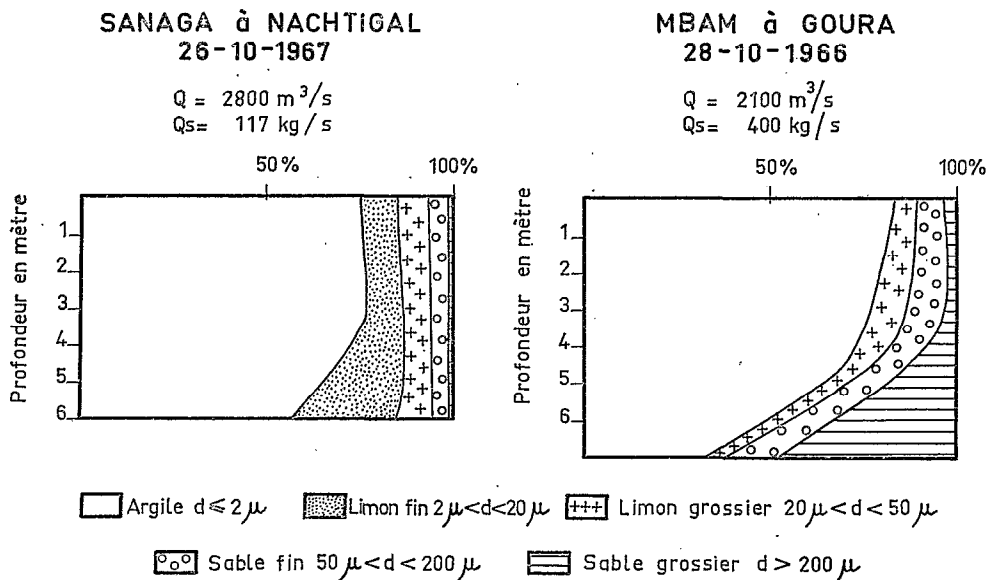


FIG. 8. — Distributions granulométriques.

3.5. — Présentation des résultats.

Le but de nos mesures est d'établir un bilan journalier des matières transportées en suspension.

Le problème est évidemment beaucoup plus complexe que pour l'établissement des débits moyens journaliers. Pour ces derniers, sur un grand bassin comme celui de la Sanaga à Nachtigal, il suffit de prendre une cote moyenne journalière à laquelle correspond d'une manière univoque un débit qui est, sensiblement, le débit moyen journalier. A une cote donnée, ou à un débit donné, ce qui dans le cas présent est équivalent, ne correspond pas un seul débit solide ou une seule concentration moyenne.

Nous avons, dans un premier stade, tracé la courbe de variations des concentrations moyennes (C_m) en fonction du temps (fig. 9). Si sur la même figure nous portons les débits moyens journaliers (hydrogramme annuel) en faisant pour chaque jour le produit $C_m Q$, nous obtenons le débit solide journalier.

Ces deux courbes ne permettent pas d'avoir une idée précise des variations de la concentration moyenne en fonction du débit. Nous avons dans cette optique porté sur la figure 10, C_m en g/m^3 , en fonction de Q en m^3/s . Il n'est pas possible de parler de courbe de variations, tout au plus pourrait-on définir une « bande » de variations. Une telle « bande » ne présente aucun intérêt pratique, elle nous montre simplement les tendances d'évolution de la concentration

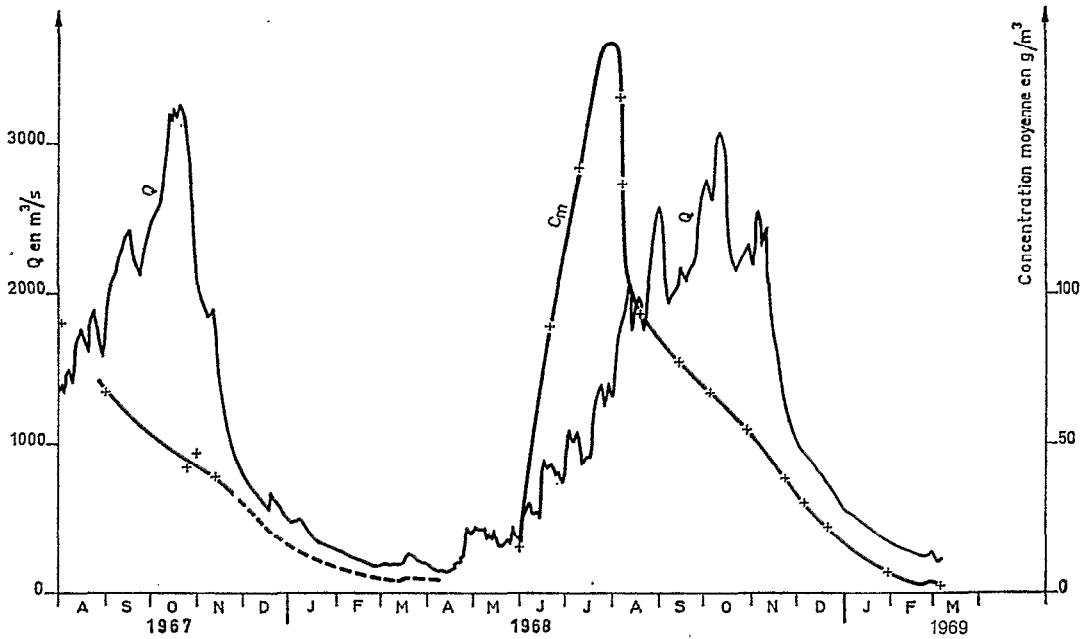


FIG. 9. — SANAGA A NACHTIGAL
Débits moyens journaliers, concentrations moyennes du débit solide. (Période 1967-1968-1969.)

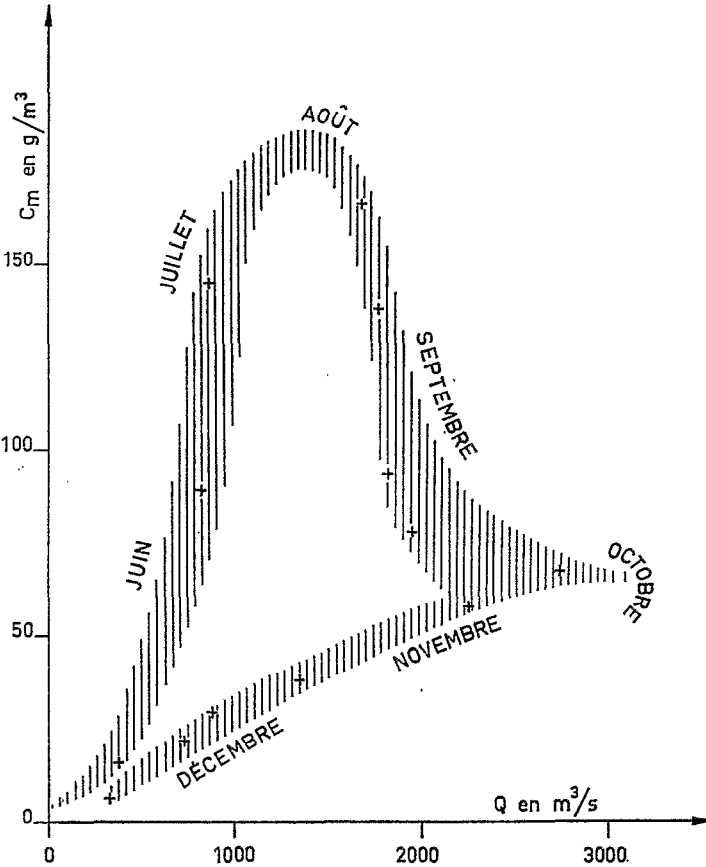


FIG. 10. — SANAGA A NACHTIGAL
Variation de la concentration moyenne du débit solide, en fonction du débit liquide en 1968.

moyenne en fonction du débit, suivant les saisons. Il en irait différemment si l'hydrogramme annuel était un hydrogramme parfait présentant une crue, un maximum et une décrue. Nous aurions alors une courbe $C_m = f(Q)$ qui serait une courbe en boucle assez régulière.

3.6. — Interprétation des résultats.

Étant donné le nombre réduit de mesures, la courbe de la figure 9 est probablement très schématique. Il est difficilement pensable de faire une mesure complète par jour, ni même tous les deux ou trois jours. Nous avons, par contre, chargé un observateur de prendre, chaque jour, au même endroit, suffisamment dans le courant, un échantillon de 10 litres d'eau. Cet échantillon devait être l'équivalent de la cote journalière servant à l'établissement des débits moyens journaliers ; nous avons vu, en effet, qu'il existait une corrélation plus ou moins étroite entre la concentration moyenne et la concentration d'un échantillon d'eau pris toujours dans les mêmes conditions (fig. 5). Les résultats obtenus ont été inexploitable, l'observateur faisant les prélèvements très irrégulièrement et souvent dans une zone d'eau morte.

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

- (1) Début de saison des pluies, d'avril-mai à fin juillet : la concentration augmente en même temps que le débit.
- (2) Pleine saison des pluies, d'août à octobre : les débits continuent à augmenter alors que la concentration moyenne décroît d'abord très rapidement — début août — puis plus faiblement jusqu'à la fin octobre.
- (3) Saison sèche : dès la fin octobre, lorsque les pluies s'espacent et que la décrue est amorcée, la décroissance de la concentration moyenne s'accélère.

Nous avons porté sur un diagramme semi-logarithmique les concentrations moyennes mesurées à partir du 6 août 1968 (fig. 11). Quatre périodes peuvent ainsi être dégagées :

- a) Décroissance rapide de la concentration moyenne jusqu'au 13 août.
- b) Décroissance plus lente de C_m jusqu'au 6 novembre.

Ces deux périodes correspondent à la pleine saison des pluies.

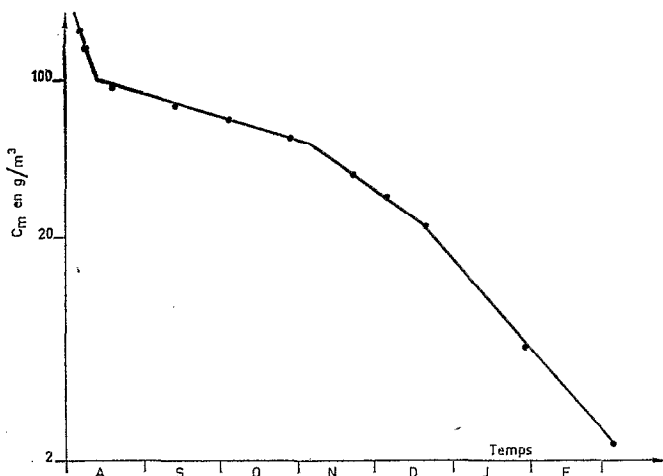


FIG. 11. — SANAGA A NACHTIGAL (1968-1969)
Décroissance de la concentration moyenne du débit solide, en fonction du temps.

c) La décroissance de C_m s'accélère à nouveau, jusqu'au 18 décembre, les pluies étant beaucoup plus espacées.

d) Décroissance très rapide de C_m , les pluies ayant cessé.

Les dates mentionnées ci-dessus ne sont évidemment valables que pour l'année 1968, le schéma de décrue devant rester sensiblement identique d'une année à l'autre.

Nous pouvons considérer que nous avons là une année dont l'hydraulicité est légèrement inférieure à la moyenne.

3.7. — Bilan.

Un bilan annuel complet n'a pu être établi que pour l'année hydrologique 1968-1969 :

Ce bilan s'élève à 2 330 000 t de matières en suspension, soit 30 t/km² an. Le module ayant été de 1 042 m³/s la concentration moyenne annuelle est de 72 g/m³.

La répartition mensuelle observée et calculée est la suivante :

1967 :

Septembre	349 000 t
Octobre.....	367 000 t
Novembre.....	141 000 t
Décembre.....	40 000 t

1968 :

Janvier	13 000 t
Février	3 600 t
Mars	2 300 t
Avril	4 900 t
Mai	16 000 t
Juin.....	123 000 t
Juillet	468 000 t
Août	563 000 t
Septembre	440 000 t
Octobre.....	429 000 t
Novembre.....	214 000 t
Décembre.....	54 000 t

1969 :

Janvier	12 000 t
Février	2 300 t

Étant conscients de l'imperfection du bilan ainsi établi, nous avons prévu, pour 1969, le programme de travail suivant :

- jaugeages complets, débits solides et débits liquides tous les 15 jours ;
- jaugeages partiels tous les 15 jours également ;
- prélèvement journalier, par un observateur consciencieux, d'un échantillon de 10 litres d'eau ;
- au cours de chaque jaugeage un échantillon de 10 litres sera également prélevé dans les mêmes conditions que ceux pris par l'observateur.

IV. — DÉBIT SOLIDE DE LA TSANAGA A BOGO

4.1. — Caractéristiques géographiques.

Le bassin de la Tsanaga — jusqu'à la station de Bogo — est compris entre 10°30' et 10°52' de latitude nord ; 13°43' et 14°37' de longitude est.

L'altitude de la station est de 333 m et la superficie du bassin versant : 1 526 km².

Le Mayo Tsanaga prend naissance dans les monts Mandara au nord-ouest de Mokolo. A hauteur de Meri le bassin est traversé du nord au sud par une avancée montagneuse. A l'ouest de cette barrière le relief est tabulaire, alors qu'à l'est une plaine en pente douce descend vers Maroua. Jusqu'à son confluent avec le Kalliao la Tsanaga se classe parmi les bassins à forte pente longitudinale.

Le Mayo Kalliao a, sur une trentaine de kilomètres depuis son confluent avec la Tsanaga, une pente identique à ce dernier, pour devenir bien plus forte au-delà.

Entre Bogo et Maroua le relief est presque inexistant.

4.2. — Caractéristiques géologiques, pédologiques et phytogéographiques.

Les grandes unités géologiques peuvent se définir ainsi :

- les massifs et inselbergs formés de roches cristallines : granites et migmatites ;
- les formations de piémont constituées par des roches d'origine détritique ;
- les massifs de roches vertes de la région de Maroua.

Les sols sont très divers.

Dans les parties les plus élevées se rencontrent des arènes détritiques et des lithosols mal protégés contre l'érosion (80% de sable).

Entre Gazawa et Maroua se trouvent des sols peu évolués sablo-argileux.

Signalons également la présence de sols de piémont en début d'évolution. Ce sont des sols compacts et imperméables.

Une savane arbustive couvre presque l'ensemble du bassin. Un début de cordon forestier se développe le long du Mayo Kalliao. La culture du mil est assez importante sur les lithosols des massifs et les vertisols des zones de piémont.

4.3. — Régime hydrologique.

Le Mayo Tsanaga est soumis au climat tropical qui se caractérise par l'alternance d'une saison absolument sèche de novembre à mars et d'une saison des pluies de juin à septembre.

L'ensemble du bassin se situe entre les isohyètes 800 et 950 mm.

Durant la saison des pluies le débit de base reste faible ; les crues se présentent sous forme de gonflements brutaux séparés par des accalmies au cours desquelles le tarissement peut descendre à quelques m³/s seulement.

4.4. — Description de la station.

Elle se situe à une centaine de mètres en amont du radier de la route Maroua-Bogo.

À hauteur de la section de mesures le lit, large de 115 m, est relativement bien marqué. Les plus grandes profondeurs, même en très hautes eaux, excèdent rarement 2 mètres et les plus fortes vitesses ponctuelles sont voisines de 1,5 m/s.

Les débits écoulés sont assez bien connus, le tarage étant satisfaisant.

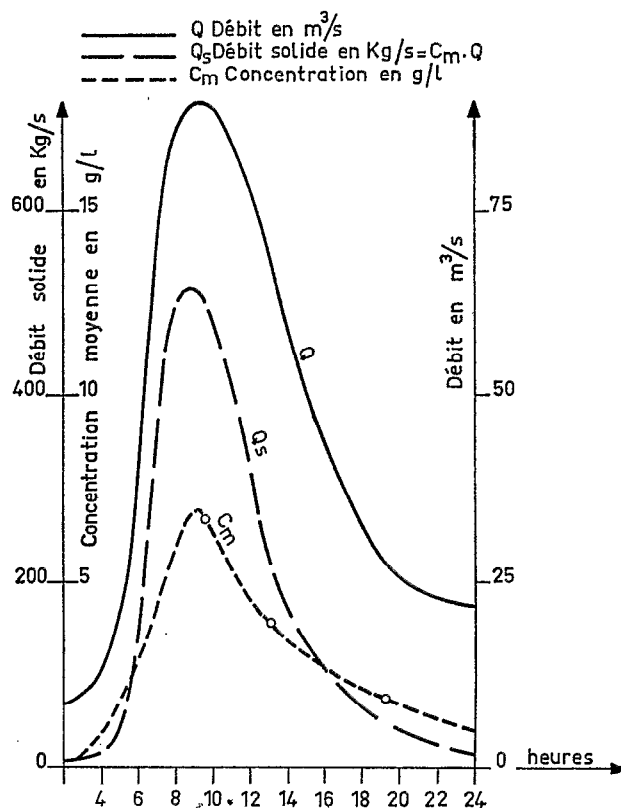


FIG. 12. — TSANACA A BOCO
Crue du 11 juillet 1968.

4.5. — Mesures des transports solides.

53 mesures complètes ont été effectuées entre le 5 juillet et le 18 octobre 1968, soit plus de 460 prélèvements.

Chaque mesure comprenait de 9 à 11 échantillons de 10 litres répartis sur 5 verticales.

Nous nous sommes souvent contentés de prendre la moyenne arithmétique des mesures ponctuelles, la mesure synchrone des concentrations et des vitesses étant pratiquement impossible ; au cours d'une crue les mesures étaient faites, à la montée, si possible au maximum, et à la décrue. Un certain nombre de prélèvements étaient faits également entre les crues.

Nous avons porté sur une même figure, pour chaque crue, l'hydrogramme, la courbe des concentrations moyennes et la courbe de variation des débits solides, cette dernière étant obtenue en faisant le produit : concentration moyenne (C_m), débit (Q) (fig. 12).

4.6. — Présentation des résultats.

Il y a 3 séries de résultats : crues de Bogo 1968, granulométrie et crues 1966-1967 à Bogo et Maroua.

4.6.1. - Bogo 1968.

A chaque crue correspond un hydrogramme de ruissellement défini en joignant linéairement le point le plus bas de la courbe de débit juste avant la montée de la crue et le point marquant sur la courbe de décrue le passage du ruissellement au débit de base, ce point est obtenu en représentant la branche descendante de l'hydrogramme en ordonnées logarithmiques, l'échelle des temps restant linéaire.

Le planimétrage de cet hydrogramme donne le volume ruisselé.

Le poids de matières solides transportées en suspension s'obtient de la même manière en planimétrant la courbe de variation du débit solide en fonction du temps.

Les colonnes du tableau, ci-après, indiquent dans l'ordre :

N^o : numéro de la crue ;

Date : date de la crue ;

V_r : volume ruisselé, en 10³ m³ ;

P_s : poids total de transport en suspension, en tonnes ;

C_{mR} : concentration moyenne en g/l ($C_{mR} = \frac{P_s}{V_r}$) ;

K : rapport des volumes ruisselés de la Tsanaga et du Kalliao à Maroua. $K = \frac{V_{rT}}{V_{rK}}$;

et fournissent les résultats des mesures faites à Bogo en 1968.

La concentration moyenne C_{mR} est différente de celle définie précédemment dans l'étude de la Sanaga à Nachtigal, où nous avons pris $C_m = \frac{Q_s}{Q}$, Q représentant le débit total écoulé, c'est-à-dire le débit dû au ruissellement ajouté au débit de base.

N ^o	Date	V _r (10 ³ m ³)	P _s (Tonne)	C _{mR} (g/l)	Q max (m ³ /s)	K = $\frac{V_{rT}}{V_{rK}}$
1	11-7-68	2 400	14 000	5,8	89,6	0,64
2	13-7-68	1 500	7 300	4,9	66,0	0,58
3	20 et 21-7-68	9 400	37 800	4,0	169	2,37
4	26-7-68	3 600	15 400	4,3	108	0,41
5	16-8-68	1 050	2 500	2,4	36,1	1,80
6	17-8-68	1 700	4 700	2,8	54,0	9,24
7	20-8-68	2 200	8 400	3,8	82,8	5,75
8	22-8-68	4 300	13 500	3,1	132	—
9	23 et 24-8-68	11 000	36 400	3,3	196	1,34
10	25 et 26-8-68	13 800	41 400	3,0	221	1,72
11	29-8-68	9 600	30 400	3,2	190	0,75
12	4-9-68	1 900	3 900	2,1	73,5	1,07
13	11-9-68	3 250	8 200	2,5	93	0,50

4.6.2. - Granulométrie.

Les tableaux suivants donnent les résultats de deux mesures de granulométrie des échantillons.

Mesure du 27-7-67 : $Q = 102 \text{ m}^3/\text{s}$.

Les prélèvements ont été faits sur deux verticales à raison de deux échantillons par verticale (un en surface, l'autre à proximité du fond), les profondeurs maximales excèdent à peine 1 m.

Profondeur		Fond	Surface	Fond	Surface
Argile	%	41	48	49	50
Limon fin	%	22	17	18	19
Limon grossier	%	16	17	18	15
Sable fin	%	7	14	13	5,5
Sable grossier	%	14	4	2	0,5

Mesure du 25-8-67 : $Q = 78 \text{ m}^3/\text{s}$.

Les échantillons ont été prélevés de la même manière que dans l'exemple précédent.

Profondeur		Fond	Surface	Fond	Surface
Argile	%	64	61	38	41
Limon fin	%	17	16	13	16
Limon grossier	%	6	8,6	27	22
Sable fin	%	2,8	4,0	19	16
Sable grossier	%	0,2	0,4	3	5

Sur une verticale donnée les variations de la distribution granulométrique sont insignifiantes. Elles peuvent être, tout de même, assez importantes d'une verticale à l'autre, d'où l'intérêt de multiplier le nombre de verticales.

4.6.3. - *Bogo Maroua* 1966-1967.

Les colonnes des tableaux, ci-après, indiquent, dans l'ordre :

Date : date du prélèvement ;

C, D ou E : crue — décrue ou étale ;

Q : débit, en m^3/s ;

Q_S : débit solide, en kg/s ;

C_m : concentration moyenne, en g/m^3 ;

C_M : concentration maximale mesurée, en g/m^3 .

Ils fournissent les résultats des mesures faites à Bogo sur la Tsanaga et lors des mêmes crues à Maroua sur la Tsanaga et sur le Kalliao en amont de leur confluence.

Tsanaga à Maroua.

Date		Q	Qs	C _m	C _M
5-8-66	D	12,1	2,7	124	185
11-8-66	D	25	8,6	295	355
14-8-66	D	41,6	28,4	728	839
25-8-66	D	48,9	58	1 012	1 137
31-8-66	D	31,6	8	242	306
16-9-66	C	31,6	12	508	130
17-10-66	D	1	ε	6	13
7-7-67	D	8,9	5,0	563	6,74
10-7-67	D	31,6	72,3	2 289	3 211
15-7-67	D	104	333	3 205	4 243
15-7-67	D	63,5	156	2 462	2 747
19-7-67	D	58,2	90,8	1 560	1 805
25-7-67	D	17,4	4,3	246	306
29-7-67	E	165	487	2 954	3 799
25-8-67	E	41,6	26,4	635	825

Kalliao à Maroua.

Date		Q	Qs	C _m	C _M
29-7-66	C	1,2	2,9	2 458	2 722
10-8-66	D	76	124	1 628	1 856
10-8-66	D	35	40	1 150	1 314
13-8-66	C	32	263	8 224	10 032
17-8-66	D	17,6	20	1 120	1 309
31-8-66	D	3,2	0,6	197	265
7-7-67	D	3,56	11	3 117	3 312
19-7-67	D	59,4	175	2 941	4 058
19-7-67	D	30,7	70	2 290	2 698
22-7-67	E	61,2	560	9 155	12 166
29-7-67	D	22,5	80	3 576	4 404
8-8-67	D	75,4	380	5 047	7 210
24-8-67	D	71	120	1 697	2 345

Tsanaga à Bogo

Date	Q	Qs	C _m	C _M
16-8-66	27,6	16,9	614	781
25-8-66	73,5	169	2 302	3 512
29-9-66	38,4	35,1	915	903
4-9-66	10	1,4	137	169
17-10-66	1,05	0,01	9	13
23-7-67	102	445	4 361	5 446
29-7-67	57,8	152	2 625	3 847
9-8-67	51,5	84	1 636	2 146
25-8-67	77,7	90	1 160	1 832
30-8-67	196	350	1 402	1 802

Les mesures faites, en 1966 et 1967, aux stations de Maroua sur la Tsanaga et son affluent le Kalliao, ont très nettement montré que pour une saison donnée les eaux du Kalliao ont une turbidité supérieure à celle de la Tsanaga. Ce phénomène était d'ailleurs prévisible étant donné les différences de pentes, de sols et de sous-sols existant entre les deux bassins.

Nous avons donc défini un coefficient K permettant de classer les crues observées à Bogo suivant leur provenance : Tsanaga ou Kalliao.

$K = \frac{V_{rT}}{V_{rK}}$, rapport des volumes ruisselés mesurés aux stations de Maroua sur la Tsanaga et le Kalliao pour une même averse.

4.7. — Interprétation des résultats.

4.7.1. - Débit solide à Bogo en 1968.

Nous avons, dans un premier stade, étudié pour 13 crues les variations du poids de matières transportées en suspension (P_s) en fonction des volumes ruisselés (V_r) (fig. 13). La dispersion étant relativement importante, nous avons étudié graphiquement les écarts des P_s observés à la courbe de la figure 13 en fonction de la date du prélèvement (fig. 14).

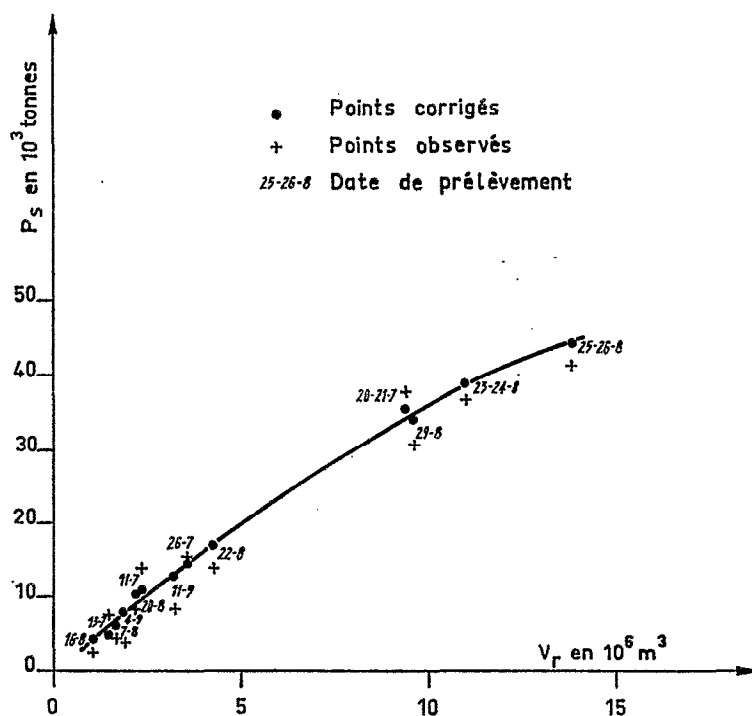


FIG. 13. — TSANAGA A BOGO

Variations du poids de matières transportées en suspension, en fonction du volume ruisselé. (P_s observés ramenés au 4 août.)

Les P_s observés corrigés sont portés sur la figure 13. La courbe tracée correspond aux P_s observés ramenés au 4 août. L'écart absolu moyen est de 615 t.

Il est bien évident qu'une telle courbe de régression n'est valable que pour une année donnée. Une étude interannuelle demanderait l'introduction de paramètres plus généraux faisant inter-

venir, par exemple, la pluviométrie journalière ou la somme des pluies depuis le début de l'année, à laquelle sont liés l'état d'humectation du sol et la croissance du tapis végétal. Une telle étude est difficilement concevable sur un bassin de cette importance.

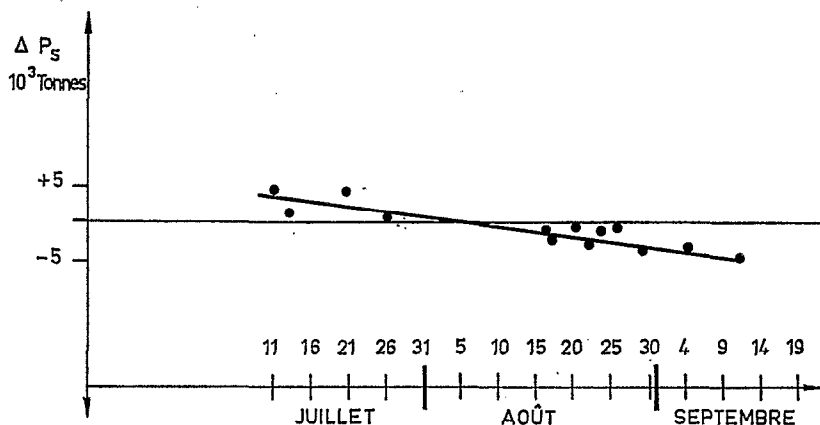


FIG. 14. — TSANAGA A BOGO

Variations du poids de matières transportées en suspension, en fonction du volume ruisselé. 1^{re} correction : date de prélèvement.

4.7.2. - Étude de la concentration.

Pour essayer de définir un ou plusieurs facteurs secondaires, nous avons étudié les variations de la concentration moyenne. C_{mR} , en fonction du temps (fig. 15).

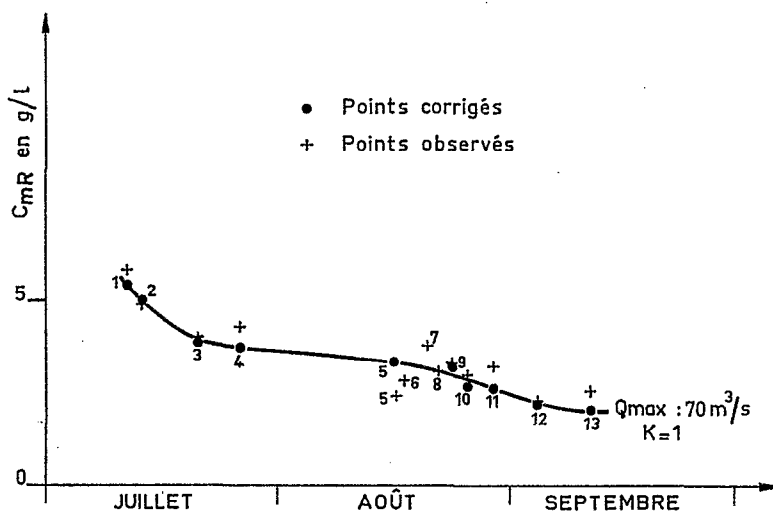


FIG. 15. — TSANAGA A BOGO

Variation de la concentration moyenne en fonction du temps, concentration moyenne corrigée par 2 facteurs. (Gr. 16, 17.)

Nous avons, tout d'abord, pensé que les C_{mR} pouvaient dépendre de l'importance de la crue que nous avons caractérisée par son débit maximal — Q_{max} — Nous avons donc étudié graphiquement les écarts des concentrations moyennes observées à la courbe de la figure 15 suivant les Q_{max} (fig. 16).

La dispersion restant encore relativement importante, nous avons cherché si ces écarts n'étaient pas liés à la provenance de la crue. L'intervention du facteur K, rapport des volumes ruisselés sur la Tsanaga et le Kalliao à Maroua, permet d'expliquer les derniers écarts (fig. 17).

La courbe obtenue (fig. 15) correspond à une crue dont le Q_{max} est de $70 \text{ m}^3/\text{s}$, et dont les volumes ruisselés observés à Maroua sur la Tsanaga et le Kalliao sont égaux ($K = 1$).

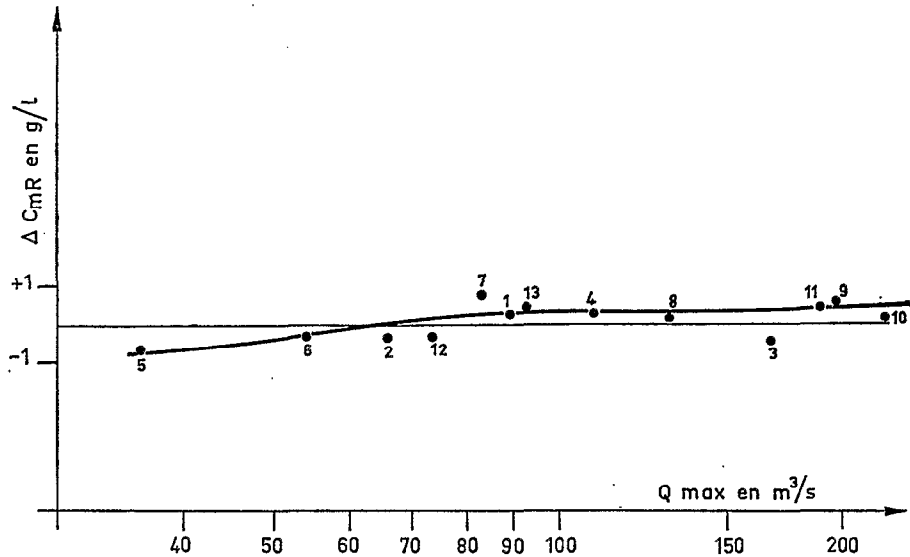


FIG. 16. — TSANAGA A BOGO

Variation de la concentration moyenne, en fonction du temps. 1^{re} correction : influence du débit maximal.

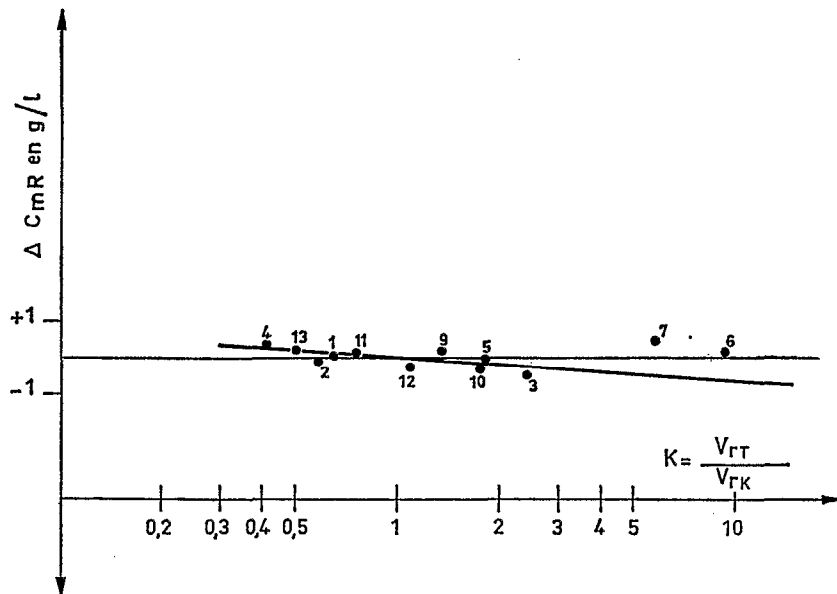


FIG. 17. — TSANAGA A BOGO

Variation de la concentration moyenne en fonction du temps. 2^e correction : influence de l'origine de la crue (facteur K).

Remarque.

Les points 6-7 semblent tout à fait aberrants. Il s'agit de deux crues qui ne se sont manifestées que sur une partie du bassin de la Tsanaga. La correction K ne serait donc valable que pour des averses suffisamment homogènes.

La courbe de la figure 15 permet de diviser l'année 1968 en trois périodes :

a) Les grosses pluies de juillet humidifient fortement le sol et permettent une croissance rapide de la végétation, d'où une chute sensible des concentrations moyennes.

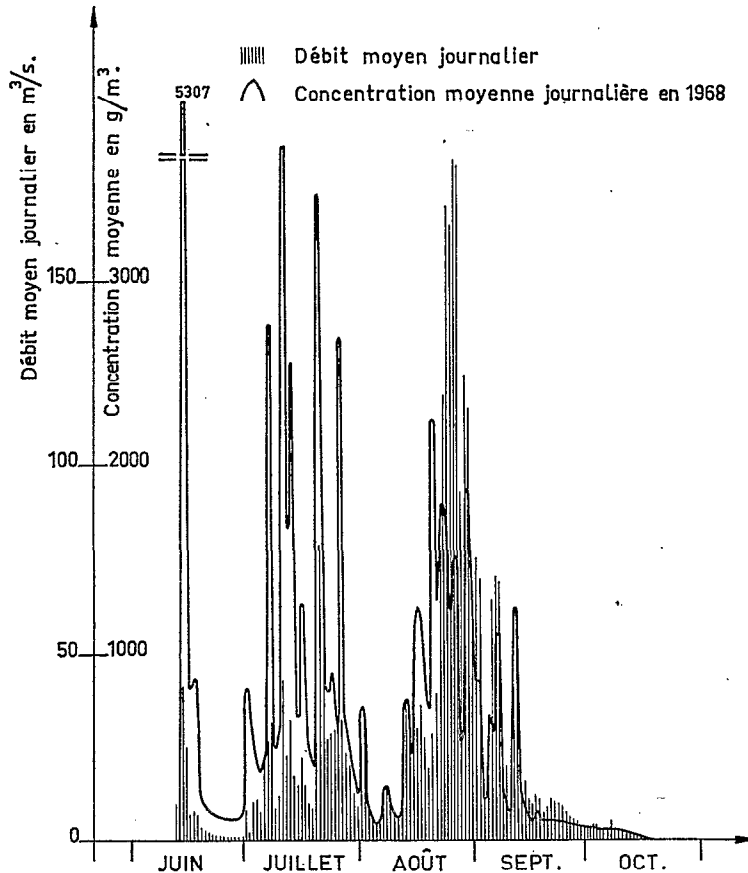


FIG. 18. — TSANAGA A BOGO
Débits moyens journaliers 1968 (liquide et solide).

b) De la fin juillet à la deuxième quinzaine d'août aucune crue notable n'a été enregistrée, d'où un assèchement du sol et arrêt de la croissance des végétaux.

c) Avec l'apparition des fortes averses de la deuxième quinzaine d'août et du début septembre, la concentration moyenne décroît, de nouveau, assez rapidement.

La diminution de la concentration moyenne de juin à octobre apparaît nettement sur la figure 18 où nous avons porté le débit moyen journalier et la concentration moyenne journalière.

Ce diagramme met bien en évidence l'erreur qui serait faite en admettant une simple régression linéaire entre Q_s et Q sans tenir compte de l'époque de l'année ni de la valeur de Q max.

4.8. — Bilan.

Le tableau, ci-après, donne le poids journalier des matières solides transportées en suspension en 1968.

Tsanaga à Bogo
Année 1968
Débits solides en tonnes/jour.

Jours	J	J	A	S	O
1		600	970	5 700	20
2		27	200	1 300	25
3		435	80	450	19
4		370	35	2 100	13
5		215	30	2 600	10
6		490	35	6 700	15
7		7 600	300	1 900	20
8		470	125	450	15
9		355	75	320	10
10		600	60	190	7
11		13 800	50	6 000	6
12		3 300	170	2 900	5
13	1 200	7 200	1 600	430	4
14	17 000	1 150	440	230	3
15	1 600	830	1 350	105	2
16	460	2 400	3 350	90	1
17	550	1 060	3 650	160	0,6
18	420	420	2 900	105	0,4
19	45	290	1 160	70	0,2
21	25	13 300	4 450	100	
22	18	2 500	8 500	80	
23	13	1 900	15 000	80	
24	10	2 250	24 000	65	
25	7	910	17 000	55	
26	5	15 000	24 000	45	
27	4	1 760	8 000	35	
28	3	1 090	3 000	30	
29	2	760	20 500	25	
30	1	310	12 000	20	
31		210	4 600		
Total	21 395	107 602	163 930	32 410	176

C'est ainsi que 255×10^6 m³ d'eau ont transporté 325 512 t de matières en suspension, soit 213 t/km². an, la concentration moyenne annuelle étant de 1 275 g/m³. Sur le Mayo Kereng, dont le bassin est de 6,6 h, la dégradation spécifique (matières charriées + matières en suspension) avait été estimée à 630 t/km². an. Il nous faut toutefois préciser que sur ce bassin le tonnage des matières charriées est de 2 à 3 fois supérieur à celui des matières transportées en suspension.

Le S.-E. du bassin a eu une pluviométrie inférieure à la moyenne, alors que la partie N.-W. la plus intéressante quant à l'étude des transports solides, a eu une hydraulicité assez forte. Par conséquent, le bilan de l'année 1968 est très probablement supérieur à la moyenne qu'on peut situer aux environs de 200 t/km². an.

Pour de tels cours d'eau à écoulement temporaire et assez torrentiel, chaque crue demandant au minimum trois séries de mesures, il n'est pas concevable d'utiliser les méthodes classiques de dépouillements faisant intervenir les vitesses, pour le calcul des débits solides. Il est donc indispensable de choisir judicieusement les points de prélèvements pour que la moyenne arithmétique des concentrations mesurées soit la plus proche possible de la concentration moyenne. La solution la plus pratique consiste à choisir une section de mesures où le brassage est suffisamment important pour que la turbidité varie assez peu d'un point à l'autre. Cette section peut éventuellement être différente de la station de jaugeage.

V. — BASSINS REPRÉSENTATIFS DU RISSO

Les bassins du Risso font partie d'un ensemble de bassins représentatifs de la cuvette tchadienne, sur lesquels sont effectuées des recherches sur le ruissellement et l'érosion.

La première campagne — 1966 — nous avait permis d'étalonner les cinq stations hydrométriques des bassins de 126 ; 76 ; 32,6 ; 14,0 et 4,33 km² et de mettre au point une méthodologie pour les mesures de débits solides, matières en suspension uniquement.

Au cours de la campagne 1967 nous avons précisé les tarages des diverses stations et mené d'une manière intensive les mesures de débits solides sur le bassin 3 de 32,6 km².

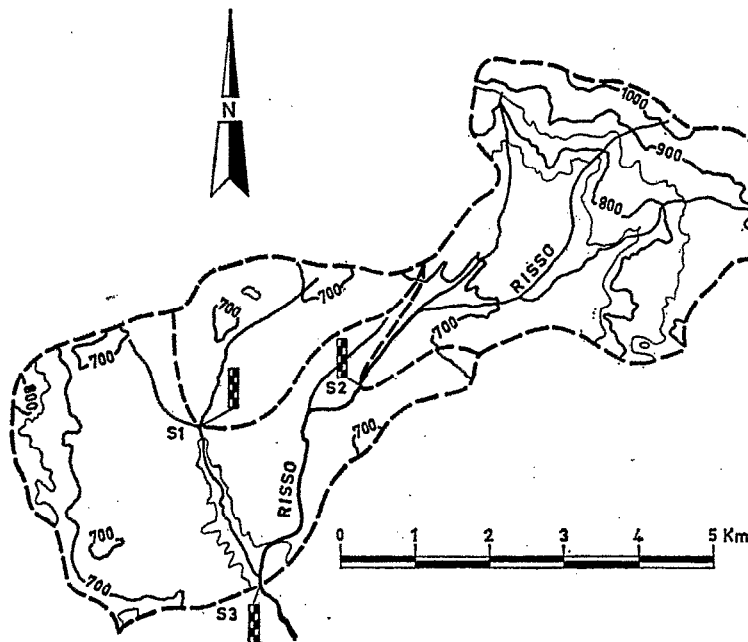


FIG. 19. — Bassins représentatifs du Risso.

5.1. — Caractéristiques géographiques.

Le bassin du Risso se situe entre les parallèles 7°52' et 8°00' Nord et les méridiens 14°40' et 14°49' Est. C'est un affluent rive gauche du Rao, lui-même affluent rive gauche de la Vina du Nord.

Le bassin 3 comprend une zone montagneuse située principalement au Nord-Est (bassin 2 de 14,0 km²) et une zone de piedmont dont le bassin 1, de 4,33 km², est tout à fait caractéristique (fig. 19).

Nous avons groupé dans le tableau, ci-après, les caractères physiques et géomorphologiques des bassins 1, 2 et 3.

Caractères physiques	BV ₁	BV ₂	BV ₃
A km ²	4,33	14,0	32,6
C	1,25	1,33	1,48
I _G	0,116	0,217	0,166
I _G	11,8	41,8	23,4
Caractères morphologiques			
R _c	3,80	3,09	3,16
R _l	2,86	2,10	2,09
D _d	2,90	8,80	6,35

- A : surface du bassin;
C : indice de compacité ou coefficient de forme;
I_p : indice de pente;
I_G : indice de pente global;
R_c : rapport de confluence;
R_l : rapport de longueur;
D_d : densité de drainage.

Contrairement au bassin 1, le bassin 2 présentant de fortes pentes et une bonne densité de drainage sera soumis à une érosion relativement importante.

5.2. — Caractères géologiques, pédologiques et phytogéographiques.

Le bassin du Risso se situe dans la partie nord du grand ensemble de massifs syntectoniques anciens qui se trouve scindé en deux parties de superficies sensiblement équivalentes (1 500 km²) par le fossé d'effondrement de la Mbéré.

Le sous-sol du bassin 3 est formé presque uniquement de granites dont certains ont une texture orientée.

Les sols sont de deux types : des arènes détritiques sur les flancs et au pied des zones montagneuses, des sols ferrugineux dans les plaines des parties centrale et aval du bassin.

Une savane arbustive, où un tapis herbacé croît progressivement dès le début de la saison des pluies, couvre l'ensemble du bassin. Localement, le long des mayos on rencontre une galerie forestière très étroite, souvent une seule rangée d'arbres.

Quelques rares cultures de mil, coton et arachide se développent dans la zone de piedmont située à proximité du village de Ndok.

5.3. — Régime hydrologique.

Le Risso se situe dans la zone de climat tropical de transition nord caractérisée par une seule saison sèche de novembre à mai et une seule saison des pluies de juin à octobre.

Le bassin 1 a des crues lentes et peu violentes (*t* montée = 1 h 45; *t* base = 7 h 15) Les coefficients de ruissellement (K_r) sont souvent supérieurs à 10% et parfois même 15% en pleine saison des pluies.

Le bassin 2 a, par contre, des crues rapides et violentes (*t* montée inférieur à une heure; *t* base = 3 heures) mais ses coefficients de ruissellement dépassent rarement 7 à 8%.

Le bassin 3 est la résultante des deux bassins précédents : *t* montée = 2 heures; *t* base = 7 h 30 ; K_r à peine supérieur à 10%.

5.4. — Mesures des transports solides réalisées.

Les berges étant relativement bien marquées nous n'avons construit que deux petites digues pour canaliser l'écoulement.

Les jaugeages et les mesures de débits solides sont faits, à l'aide d'une perche, à partir d'une passerelle de 8 m située à plus de 3 m au-dessus du fond du lit du Mayo.

La priorité ayant été donnée, en 1966, à l'étalonnage des stations, les quelques mesures de débits solides effectuées aux différentes stations ont surtout servi à choisir une méthodologie aussi pratique que possible. Il nous est alors paru souhaitable de faire porter notre effort sur une seule station. Nous avons opté pour le bassin 3 qui a l'avantage d'englober la station 2, tout en ayant des temps de montée et de base relativement longs.

Toutes les mesures ayant été dépouillées par la méthode classique — double intégration graphique — nous avons souvent perdu un temps précieux à mesurer les vitesses du courant. C'est à la suite de cette expérience que nous avons décidé, pour les rivières ayant des variations rapides de débit, de multiplier, le plus possible, les prélèvements et de prendre pour concentration moyenne la moyenne arithmétique des concentrations. Il est, en effet, préférable d'avoir une mesure de qualité moyenne qu'une mesure incomplète ou pas de mesure du tout.

Nous avons groupé dans le tableau, ci-après, les données suivantes :

- N^o : numéro de la crue ;
- Date : date de la crue ;
- P : pluie moyenne, en mm ;
- I max : intensité maximale durant 5 minutes, en mm/h, prise au pluviographe PE 16 situé au centre du bassin 2 ;
- V_R : volume ruisselé, en m³ ;
- K_R : coefficient de ruissellement, en % ;
- Q max₂ : débit maximal à S2, en m³/s ;
- Q max₃ : débit maximal à S3, en m³/s ;
- P_s : poids total de matières solides transportées en suspension, en tonne. Ce poids est obtenu par planimétrie de la courbe de débit solide ;
- C_{mR} : concentration moyenne, en g/m³.

Cette concentration s'obtient en faisant le rapport $\frac{P_s}{V_R}$ les unités étant rendues homogènes.

N ^o	Date	P (mm)	I max. (mm/h)	V _R (m ³)	K _R (%)	Q max ₂ (m ³ /s)	Q max ₃ (m ³ /s)	P _s (t.)	C _{mR} (g/m ³)
1	28-7	22,4	108	8 200	1,1	1,96	0,96	1,25	152
2	14-8	91,6	156	128 600	4,3	5,78	9,88	54,6	424
3	6-9	37,5	134	48 750	4,0	9,88	25,89	21,8	447
4	8-9	29,0	96	66 200	7,0	5,42	6,24	17,0	256
5	12-9	62,0	36	152 700	7,5	2,16	8,64	29,7	194
6	18-9	32,4	48	53 100	5,0	1,62	4,50	7,0	132
7	20-9	41,4	120	108 300	8,0	7,46	7,76	41,0	378

Le tableau suivant fournit les résultats d'une analyse granulométrique des sédiments du Risso à Ndok — S3 : 32,6 km².

Mesures du 14-8-67 : Q = 8,4 m³/s.

Profondeur		Fond	Surface	Fond	Surface
Argile	%	73	74	78	80
Limon fin	%	23	22	18	16
Limon grossier	%	1,5	1,5	2	2
Sable fin	%	1,5	1,5	1,5	1
Sable grossier	%	1	1	0,5	1

D'autres mesures effectuées à des dates différentes ont donné des répartitions granulométriques très proches.

5.5. — Interprétation des résultats.

La figure 20 montre les variations du poids de matières transportées en suspension en fonction du volume ruisselé. Ce volume est connu avec suffisamment de précision, la séparation de l'écoulement de base du ruissellement retardé et du ruissellement pur présentant peu de difficultés.

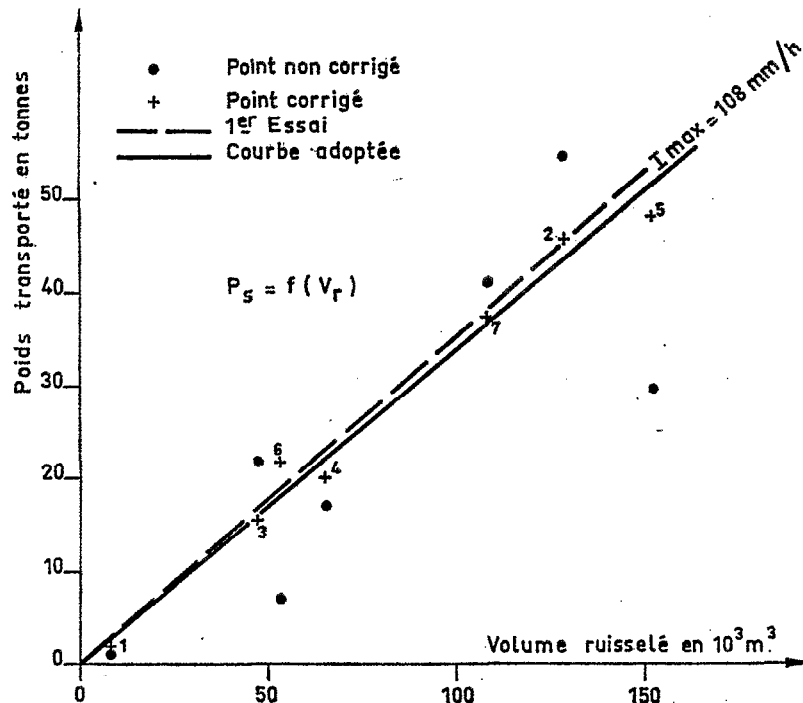


FIG. 20. — LE RISSO A S3

Poids de matières transportées en suspension en fonction du volume ruisselé.

Nous avons étudié graphiquement les écarts du poids observé à la droite de la figure 20 (droite en tirets) suivant l'intensité maximale mesurée, pendant 5 minutes, au pluviographe PE 16 situé au milieu du bassin 2, d'où la courbe de correction de la figure 21.

Les poids observés corrigés sont portés sur la figure 20 :

$$P_{SC} = P_S + \varepsilon l.$$

La droite de régression a pour équation : $P_S = 0,84 V_R$ (à $I = 108 \text{ mm/h}$).

Elle correspond à une averse dont l'intensité maximale a été de 108 mm/h au pluviographe PE 16. La courbe de la figure 21 donne les corrections à apporter aux poids précédents pour d'autres valeurs de $I \text{ max}$.

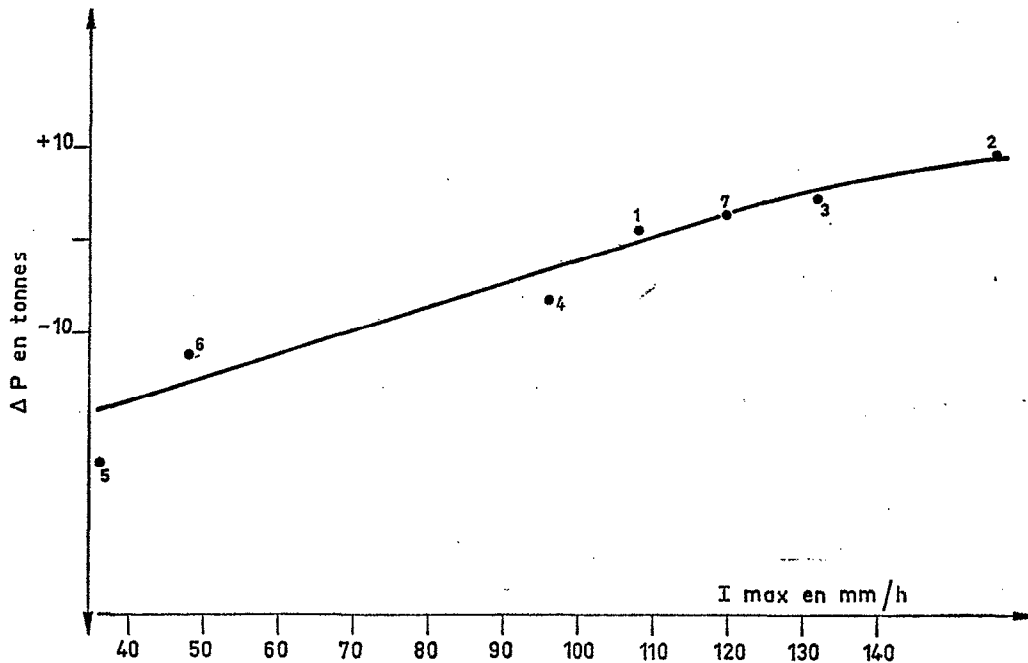


FIG. 21. — LE RISSO A S3.

Poids de matières transportées en suspension en fonction du volume ruisselé. Correction E_l en fonction de l'intensité maximale de l'averse (en 5 minutes).

L'année 1967 présente l'inconvénient d'avoir eu une faible pluviosité (année sèche : fréquence 1/5 environ). Entre le 18 juillet et le 20 septembre, dates entre lesquelles ont été faites les mesures de débits solides, l'importance du tapis végétal et les indices d'humidité n'ont pas suffisamment évolué pour qu'il soit possible de faire une étude des variations des concentrations moyennes dans le temps. Pour mettre en évidence l'importance de l'érosion sur le bassin 2 nous avons étudié les variations des concentrations moyennes (C_{mR}), mesurées à S3, en fonction du débit maximal enregistré à S2 (fig. 22). Nous avons ensuite étudié graphiquement les écarts des concentrations mesurées à la droite de la figure 22 (droite en tirets) suivant le débit maximal observé à S3 ; les matières transportées en suspension transitant par S3 ne pouvant évidemment pas provenir uniquement du bassin 2 ; d'où la courbe de correction de la figure 23.

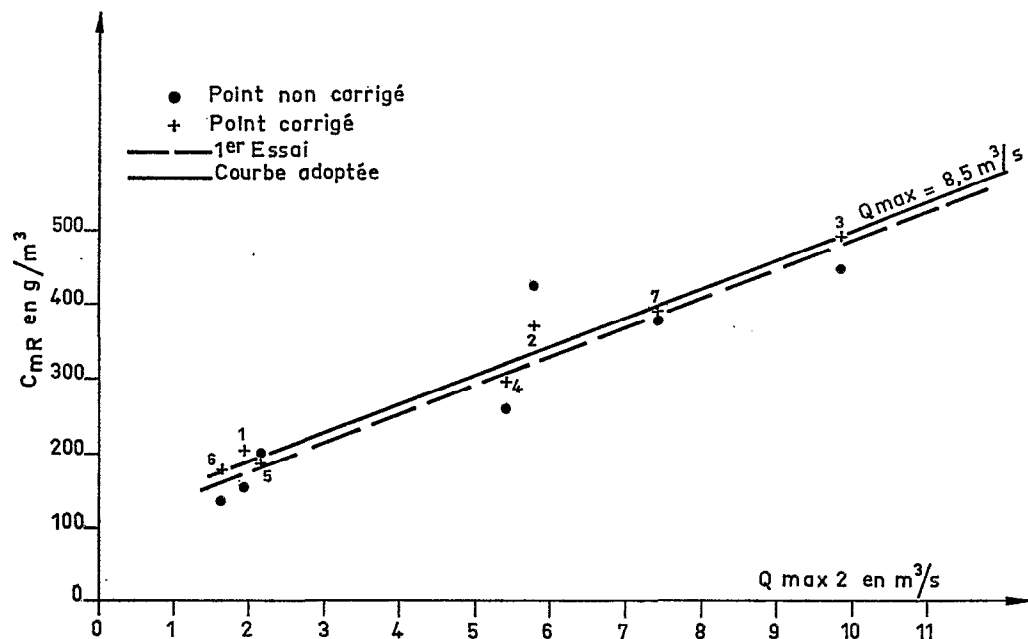


FIG. 22. — LE RISSO A S3.
Variations de la concentration moyenne en fonction du $Q \max_2$ à S2.

Les concentrations moyennes corrigées figurent sur la figure 22. Il est fort probable que pour des $Q \max_2$ inférieurs à 1 ou 2 m^3/s la concentration moyenne décroît très rapidement avec le débit. Au-delà de 2 m^3/s la courbe de régression est une droite d'équation :

$$C_{mR} = 0,36 (Q \max_2 + 6,7).$$

Cette courbe correspond à un débit maximal de 8,5 m^3/s à la station 3.

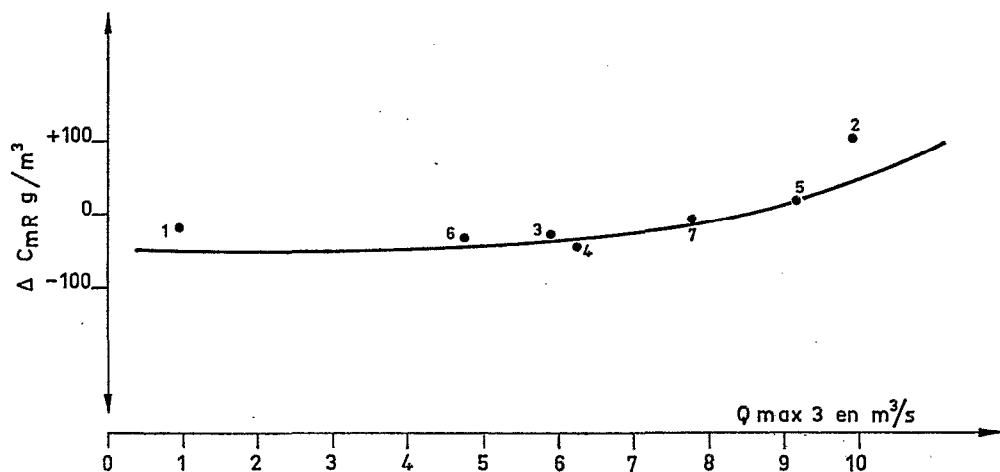


FIG. 23. — LE RISSO A S3.
Variation de la concentration moyenne, en fonction du $Q \max_2$ à S2. Correction C1 en fonction du $Q \max_3$ à S3.

5.6. — Bilan.

Le tableau, ci-après, donne le poids journalier des matières solides transportées en suspension en 1967 par le Risso à S3.

C'est ainsi que $6\,665 \times 10^3 \text{ m}^3$ d'eau ont transporté 562 t de matières en suspension, soit 17 t/km².an. la concentration moyenne étant de 85 g/m³.

On peut estimer que sur S2 l'érosion a été supérieure à 30 t/km².an. une diminution très sensible des vitesses se produisant entre les stations 2 et 3. La concentration moyenne serait alors voisine de 115 g/m³.

L'année 1967 ayant été exceptionnellement sèche, sans crue importante en mai-juin et juillet, nous pouvons raisonnablement penser que le bilan 1967 est très inférieur à la moyenne.

Risso à S3
Année 1967
Débits solides, en tonnes/jour

Jours	J	A	S	O	N
1		1,0	3,1		
2		0,35	2,5		
3			2,0		
4			1,7		
5		2,1	6,3		
6		2,0	29,0		
7		0,78	6,3		
8			25,3		
9			8,0		
10			5,2		
11			4,3		
12			34,8		
13			7,8		
14		54,6	5,1		
15		12,6	6,2		
16		4,3	4,2		
17		2,2	4,0		
18	1,6	1,6	13,3		
19	0,64	1,1	5,0		
20		0,86	53,2		
21		1,0	17,3		
22	0,75	1,1	13,6		
23		1,0	8,5		
24		1,9	5,0		
25		2,2	4,8		
26		1,4	6,4		
27		0,52	8,2		
28	1,7	0,86	10,2		
29	0,65	4,1	9,0		
30		9,0	5,2		
31		4,3			
Total en t	5,3	110,9	315,5	(120)	(10)

Nous nous sommes efforcés de dégager les différents facteurs qui conditionnent l'érosion hydrique sur des bassins de quelques dizaines de kilomètres carrés.

Bien que les mesures faites en 1967 soient insuffisantes et que cette année se prête mal à une telle étude, il semble indéniable que cette érosion est intimement liée à l'état d'humectation du sol et par là même aux saisons. L'importance des averses de début de saison des pluies est primordiale, une série de petites averses peut permettre le développement d'un tapis végétal avant même que les matières pulvérulentes aient pu être transportées.

Les intensités maximales jouent probablement un rôle plus important que les intensités moyennes calculées sur la durée du corps de l'averse. La notion de pluie efficace (ou pluie utile) reste, malgré tout, intéressante dans la mesure où l'on peut définir une intensité limite au-dessus de laquelle les premiers transports solides apparaissent ou pourraient apparaître.

L'importance des crues que nous avons caractérisées par leur débit maximal est également un facteur non négligeable. Nous pourrions également faire intervenir les temps de montée ou de base, ou, plus simplement, le coefficient de forme $\frac{Q_{\max.}}{Q_{\text{moy.}}}$ qui traduit le caractère plus ou moins aigu de la pointe de crue.

VI. — MESURES DIVERSES SUR D'AUTRES BASSINS

Un certain nombre de prélèvements ont été effectués, à différentes périodes, sur diverses rivières du centre du Cameroun. Ces mesures fragmentaires ne permettent pas de dégager un bilan détaillé complet, mais constituent néanmoins un critère permettant de comparer un certain nombre de bassins entre eux.

6.1. — Le Mbam à Goura.

La station de Goura, située sur le Mbam, principal affluent de la Sanaga, contrôle un bassin de 42300 km².

Après une descente rapide de 1 900 à 700 m le Mbam présente, dans son cours moyen qui draine le sud-ouest de l'Adamaoua, une pente moyenne relativement faible. Sa pente va tout de même s'accroître dans son cours inférieur pour devenir maximale après son confluent avec le Noun.

Le sous-sol est constitué de formations précambriennes du complexe de base — surtout des migmatites — dans lesquelles apparaissent quelques massifs de roches intrusives et éruptives anciennes — granites et syénites. Des roches volcaniques récentes — basaltes et trachytes — se rencontrent à l'Ouest, elles représentent 12% de la surface totale du bassin. L'altération latéritique de surface est généralement assez importante.

La forêt couvre environ 25% de la superficie du bassin, le reste étant le domaine des savanes et des galeries forestières.

L'ensemble du bassin, qui se situe entre les isohyètes 1 500 et 2 000 mm, est soumis au climat tropical de transition. La pluviométrie moyenne peut être estimée à 1 780 mm.

Le module est de 750 m³/s environ, la plus forte crue enregistrée a atteint 2 850 m³/s, le débit d'étiage absolu observé est de 61 m³/s.

Nous avons porté dans le tableau, ci-après, les valeurs suivantes représentant les mesures de débit solide effectuées :

Date : date de la mesure ;

C-D : crue ou décrue ;

Q : débit, en m³/s ;

Q_S : débit solide, en kg/s ;

C_m : concentration moyenne, en g/m³ ;

C_M : concentration maximale mesurée, en g/m³ .

Date	Crue Décrue	Q (m ³ /s)	Q _S (kg/s)	C _m (g/m ³)	C _M (g/m ³)
20-10-66	C	2 100	400	190	293
7-11-66	D	1 400	158	113	192
10-11-66	C	1 660	281	169	370
15-11-66	C	1 290	149	115	201
23-11-66	D	920	60	74	126
2-12-66	D	590	30,3	51	60
15-12-66	D	410	8	19	27
5-5-67	C	180	13,8	77	99
17-5-67	D	135	4,0	29	46
5-7-67	C	375	59	157	190
23-10-67	D	2 480	181	73	132
19-7-68	C	935	170	182	212

La figure 24 montre les variations du débit et de la concentration moyenne au cours de la décrue 1966.

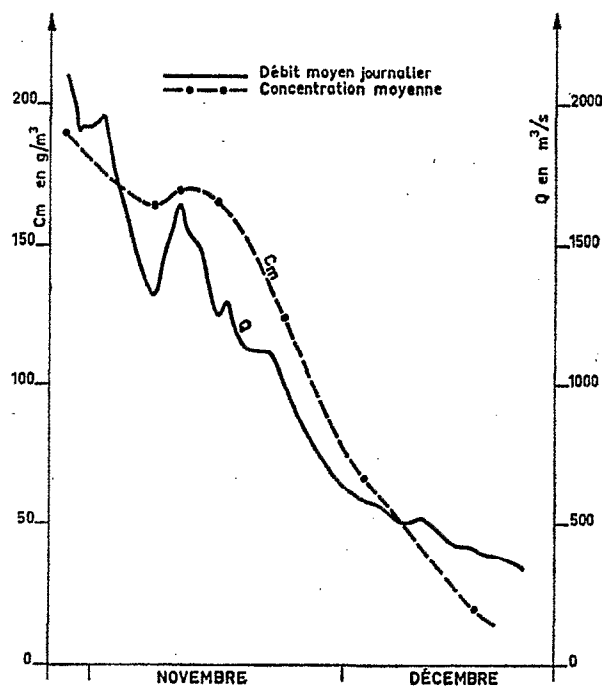


FIG. 24. — LE MBAM A GOURA
Décrue 1966.

Il ne nous a pas été possible d'établir un bilan annuel complet pour l'année 1966-1967 :

1966 :

Octobre	960 000 t soit 31 000 t/j
Novembre	340 000 t soit 11 300 t/j
Décembre	27 000 t soit 870 t/j

1967 :

Janvier	1 600 t soit	52 t/j
Février	1 100 t soit	39 t/j
Mars.....	1 000 t soit	32 t/j
Avril	2 100 t soit	70 t/j
Mai.....	17 000 t soit	550 t/j
Juin.....	55 000 t soit	1 830 t/j
Juillet	400 000 t soit	12 900 t/j

D'août 1966 à juillet 1967 le Mbam aurait transporté de 3,5 millions à 4 millions de tonnes de matière en suspension, soit 90 t/km^2 . *an environ*.

Compte tenu que l'année 1966 a eu une hydraulicité proche de la moyenne et de l'imprécision des calculs, on peut simplement estimer que l'érosion moyenne se situe entre 60 et 90 t/km^2 . *an*, soit une concentration moyenne annuelle comprise entre 105 g/m^3 et 160 g/m^3 .

Le tableau suivant fournit les résultats d'une analyse granulométrique du sédiment du Mbam, rivière calme et sans brassage excessif; ces résultats sont comparés à ceux de la Sanaga sur la figure 8.

Mesures du 28-10-66 : $Q = 2\,100 \text{ m}^3/\text{s}$;
 $Q_s = 400 \text{ kg/s}$.

Profondeur en m		50	200	400	635
Argile	%	82	79	73	43
Limon fin	%	—	—	—	—
Limon grossier	%	7	9	9	5
Sable fin	%	8	10	10	13
Sable grossier	%	3	2	8	33

6.2. — Djerem à Mbakaou.

La superficie du bassin versant du Djerem à Mbakaou est de $20\,390 \text{ km}^2$.

En amont de la station hydrométrique, le Meng principal affluent du Djerem et le Maour traversent une vaste zone marécageuse de plusieurs dizaines de kilomètres carrés.

Le bassin supérieur est formé de roches éruptives — granites — et de roches volcaniques anciennes et récentes — basaltes.

Le bassin inférieur comprend des migmatites et des granites et un recouvrement sédimentaire du crétaé moyen, série gréseuse de la Mbéré.

Une savane arbustive avec galeries forestières couvre l'ensemble du bassin.

Situé entre les isohyètes $1\,500 \text{ mm}$ et $1\,800 \text{ mm}$, la pluviométrie moyenne étant voisine de $1\,650 \text{ mm}$, le bassin du Djerem est soumis au climat tropical de transition.

Ses caractéristiques hydrologiques sont les suivantes :

Module	$410 \text{ m}^3/\text{s}$.
Crue maximale enregistrée	$2\,100 \text{ m}^3/\text{s}$.
Étiage absolu observé	$10 \text{ m}^3/\text{s}$.

A la demande de la Société Enelcam nous avons, au cours de la campagne 1967, effectué 10 mesures complètes et 3 mesures partielles de débits solides.

Dans le tableau, ci-après, en figurent les résultats :

Date : date de la mesure;

Q : débit, en m^3/s ;

Q_s : débit solide, en kg/s ;

C_m : concentration moyenne, en g/m^3 ;

P : mesure partielle.

Date	Q (m^3/s)	Q _s (kg/s)	C _m (g/m^3)
17- 9-67	844	70	83
20- 9-67	906	117	129
26- 9-67	890	96	108
29- 9-67	958	144	150
8-10-67	1 080	103	95
14-10-67	1 140	83	73
21-10-67	970	51	53
26-10-67	670	37	55 P
27-10-67	596	27	45 P
28-10-67	580	24	41 P
12-11-67	375	16,5	44
13-11-67	363	12,2	34
7-12-67	204	4,0	20

La figure 25 donne les variations du débit et de la concentration moyenne de septembre à décembre 1967.

Nous constatons, une fois de plus, que la décroissance des concentrations précède de plusieurs jours la décrue.

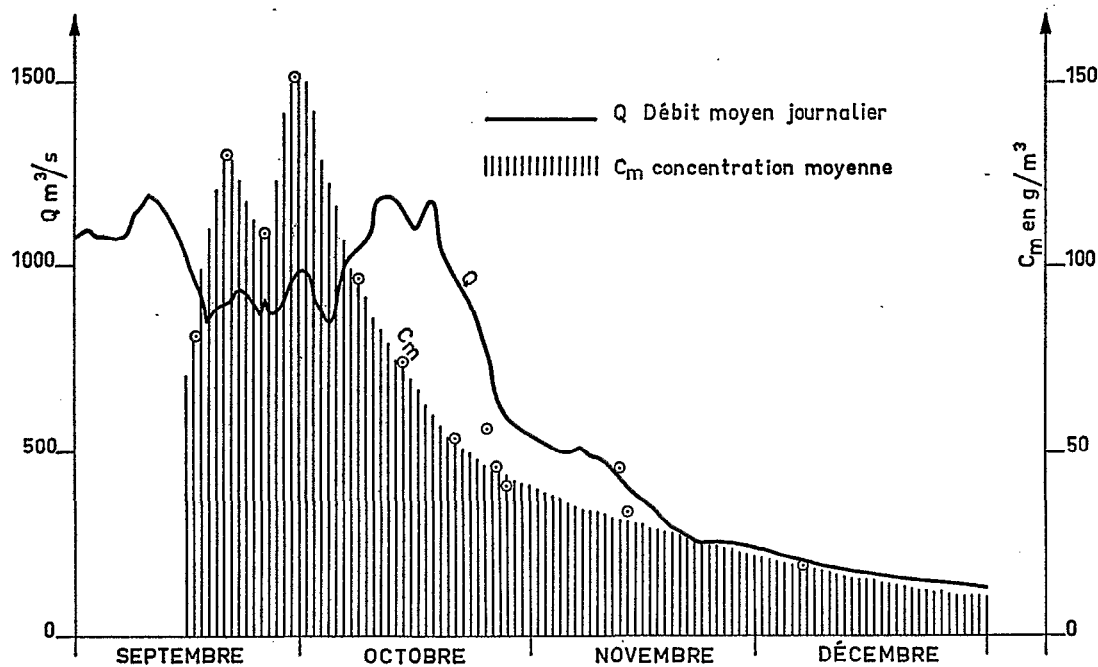


FIG. 25. — DJEREM A MBAKAOU en 1967.

Dans le bilan annuel, seuls les mois d'octobre, novembre et décembre sont connus avec précision, les autres valeurs ne sont que des extrapolations.

Janvier	}	4 000 t soit	33 t/j
Février			
Mars			
Avril			
Mai			
Juin		18 000 t soit	600 t/j
Juillet		150 000 t soit	4 800 t/j
Août		450 000 t soit	14 500 t/j
Septembre		340 000 t soit	11 500 t/j
Octobre		200 000 t soit	6 450 t/j
Novembre		29 700 t soit	990 t/j
Décembre		7 500 t soit	242 t/j
Total 1967		1 200 000 t soit	3 290 t/j

Dans la note hydrologique intitulée « Djerem à Mbakaou mars 1968 » nous avons établi un premier bilan, à partir des courbes $Q_s = f(Q)$, qui se chiffrait à 1 500 000 t. La différence entre les deux valeurs annuelles calculées par deux méthodes différentes est ainsi voisine de 20%. On peut donc estimer que l'érosion sur le bassin du Djerem a été, en 1967, de $59 \text{ t/km}^2.\text{an}$, soit une turbidité moyenne annuelle de 105 g/m^3 .

Compte tenu que l'année 1967 a eu une hydraulicité inférieure à la moyenne d'avril à décembre — excepté en août — on peut admettre que l'érosion moyenne annuelle se situe aux environs de $70 \text{ t/km}^2.\text{an}$, soit une turbidité moyenne annuelle de 110 g/m^3 .

6.3. — Le Rao à Foumban.

La station du Rao à Foumban est située à 20 km en amont du confluent de la Vina et à 50 m en aval du confluent du Risso. Elle contrôle un bassin de $1\,345 \text{ km}^2$.

La pente moyenne est assez forte. Le sous-sol est formé presque exclusivement de granites syntectoniques anciens.

Une savane arbustive couvre l'ensemble du bassin qui est soumis au climat tropical de transition Nord. La pluviométrie moyenne annuelle est de $1\,450 \text{ mm}$ environ.

Ses caractéristiques hydrologiques peuvent se définir ainsi :

Module	12 m^3/s
Crue maximale observée	361 m^3/s
Étiage absolu	voisin de 0

Les colonnes du tableau, ci-après, indiquent dans l'ordre les résultats des mesures effectuées :

Date : date de la mesure;

C-D : crue ou décrue;

Q : débit, en m^3/s ;

Q_s : débit solide, en kg/s ;

C_m : concentration moyenne, en g/m^3 .

Date	C-D	Q (m ³ /s)	Q _s (kg/s)	C _m (g/m ³)
18-7-68	D	3,5	0,195	56
29-7-68	C	3,6	0,157	44
5-8-68	C	7,1	1,00	141
10-8-68	D	13,0	0,94	72
15-8-68	D	19,9	2,58	130
15-8-68	D	19,3	2,44	126
28-8-68	D	6,1	0,246	40
30-8-68	D	43	7,85	183
1-9-68	D	48	9,30	194
1-9-68	D	40	7,03	176
4-9-68	D	17,0	1,64	96
7-9-68	D	21,9	2,78	127
9-9-68	D	14,5	1,73	119
12-9-68	C	10,8	0,61	56
13-9-68	D	66	15,0	227
13-9-68	D	57	11,0	193
14-9-68	D	32	4,15	128
18-9-68	D	42	10,3	245
20-9-68	D	74	15,5	209

Étant donné que la plupart des mesures ont été faites en décrue et que nous nous sommes servis des débits moyens journaliers pour le calcul du bilan annuel 1967, ce bilan n'est qu'une limite inférieure du bilan réel :

Juin	15 t
Juillet	345 t
Août	3 700 t
Septembre	14 400 t
Octobre	2 000 t
Novembre	15 t
Total	20 500 t soit 15 t/km².an.

Cette valeur est comparable à celle trouvée pour le Risso à S3 (17 t/km².an).

VII. — CONCLUSION

Nous avons groupé dans le tableau, ci-après, les caractéristiques de l'érosion sur les différents bassins étudiés jusqu'ici au Cameroun et dont les résultats ont été présentés dans cet article.

Les quantités de matières solides transportées en suspension sont très sensibles aux variations interannuelles de l'hydraulicité. C'est ainsi que n'ayant enregistré sur le Risso et le Rao aucune crue notable en mai-juin et juillet 1967, l'érosion annuelle sur les bassins versants de ces rivières a probablement été très inférieure à la moyenne, si on se réfère aux valeurs trouvées pour des rivières dont le bassin versant est beaucoup plus grand et dont une partie est recouverte de forêt.

Pour les rivières du Cameroun soumises au régime tropical de transition, l'érosion annuelle doit se situer entre 30 et 100 t/km².an suivant la surface du bassin, sa géomorphologie, son sol, son sous-sol, sa végétation et le caractère des précipitations.

Dans les différentes études que nous avons effectuées les matériaux transportés en suspension proviennent presque exclusivement de l'érosion hors des réseaux hydrographiques principaux. Cette érosion est avant tout une *érosion pluviale* dont le rôle est double. Tout d'abord l'impact des gouttes de pluie sur le sol exerce une dispersion et un arrachement des particules de terre — ce phénomène est surtout sensible en début de saison des pluies lorsque le sol est pratiquement nu — le ruissellement intervient ensuite non seulement comme agent d'érosion mais également comme agent de transport. En pleine saison des pluies, quand le couvert végétal est suffisamment dense, seul le ruissellement joue un rôle actif.

Tableau comparatif des mesures d'érosion au Cameroun.

Rivière	Station	BV (km ²)	Sous-sol	Végétation	Pentes	Régime hydrologique	Érosion (t/km ² .an)	Hydraulicité observée
Sanaga 1968-69	Nachtigal	77 000	Roches métam. éruptives - volcan. - sédim.	Savane forêt (30 %)	Moyennes	Tropical transition	30	Année moyenne
Mbam 1966-67	Goura	42 300	Roches métam. éruptives et volcaniques	Savane forêt (25 %)	Assez fortes	Tropical transition	60-90	Année moyenne
Djerem 1967	Mbakaou	20 400	Roches métam. éruptives-volcan.-sédim.	Savane	Assez fortes sur le haut bassin	Tropical transition	59	Faible hydraulicité
Tsanaga 1968-69	Bogo	1 526	Roches métam. et éruptives roches vertes	Savane arborée	Fortes sur la moitié du bassin	Tropical	213	Année légèrement supérieure à la moyenne
Rao 1967	Foumban	1 350	Granites	Savane arbustive	Assez fortes	Tropical transition	15	Très faible hydraulicité
Risso 1967	S3	32,6	Granites	Savane arbustive	Fortes sur le haut bassin	Tropical transition	17	Très faible hydraulicité

Les différents facteurs de l'érosion continentale, en climat tropical ou tropical de transition comprennent donc :

- *les caractères des précipitations* : hauteur, intensité, durée;
- *la nature et l'état du sol* : sols meubles ou compacts, secs ou humides;
- *la végétation*, dont le caractère saisonnier joue un rôle très important;
- *la géomorphologie* du bassin.

Des facteurs secondaires tels que le vent ou l'action chimique de l'eau jouent un rôle insignifiant, sinon nul : le vent ne souffle que très rarement avant les tornades et l'agressivité de l'eau est faible.

Certains de ces facteurs ont un caractère quasi permanent. Ce sont la géomorphologie et la nature du sol. Tous les autres varient sensiblement au cours d'un cycle annuel et se caractérisent surtout par une interdépendance très étroite, les précipitations étant, du moins au début d'un cycle, le facteur essentiel.